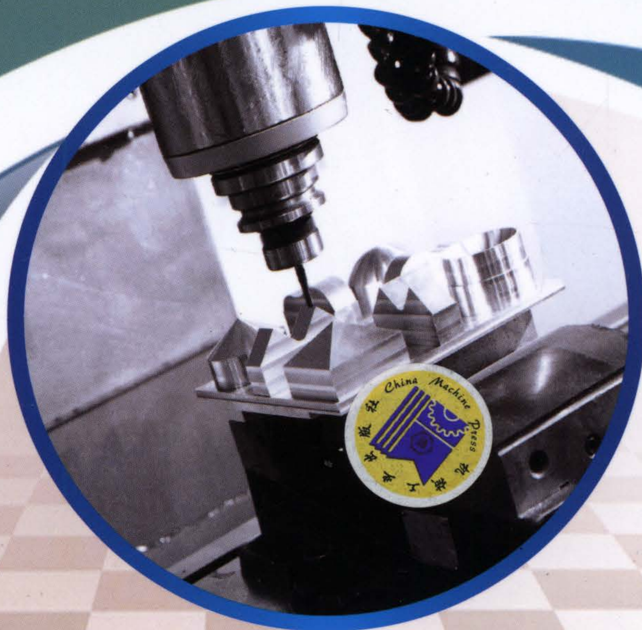
教你精通数控编程100例

杨顺田 著





机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

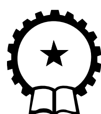
VISIT…

LANZAROTE

Caliente.COM

教你精通数控编程 100 例

杨顺田　著



机 械 工 业 出 版 社

本书精选了一百多个零件实例，对加工工艺分析，刀具、夹具、切削用量选用，编程指令格式说明到程序注解等方面进行了详细讲述，内容涵盖了数控车削、铣削、镗削、电加工等中、高级数控编程的绝大部分知识点。全书共分 5 章，第 1、2 章围绕 SINUMERIK 840D 系统编程进行讲解，FANUC 数控系统在中小型数控机床及教学中应用很广，单独列为一章，作为第 3 章，前三章适合初、中级读者学习；第 4 章为 R 参数编程与宏程序及其应用，反映了最新研究成果，适合高级读者学习；第 5 章为其他数控系统编程，可方便使用其他数控系统的读者学习；第 6 章是线切割编程。

本书不仅可作为机械制造、数控专业的教材或参考书，也可作为中、高级人才的数控培训教材、自学教材及参考资料。

图书在版编目（CIP）数据

教你精通数控编程 100 例/杨顺田著．—2 版．—北京：机械工业出版社，2015.1

ISBN 978－7－111－49064－7

Ⅰ.①教…　Ⅱ.①杨…　Ⅲ.①数控机床－程序设计　Ⅳ.①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 311794 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：周国萍　责任编辑：周国萍　李　超
版式设计：常天培　责任校对：刘雅娜
封面设计：马精明　责任印制：刘　岚

北京京丰印刷厂印刷

2015 年 4 月第 2 版·第 1 次印刷
184mm×260mm·19.25 印张·473 千字
0 001—3 000 册
标准书号：ISBN 978－7－111－49064－7
定价：59.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
电话服务　　网络服务
服务咨询热线：(010) 88361066　机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：(010) 68326294　机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
(010) 88379203　教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版
金 书 网：www.golden-book.com

前　言

“中国梦就是强国梦，就是要实现中华民族的伟大复兴”。制造业是国民经济的主体，是提高综合国力、实现复兴的物质基础。数控技术是机械制造业的核心。因此，必须培养和造就一大批掌握先进数控技术与工艺的中、高级技术人才，这需要高等（职业）院校与社会共同承担起这项任务。本书是在充分考虑专业教学与企业技术人员提高数控编程技能的需要而编写的一部专著。

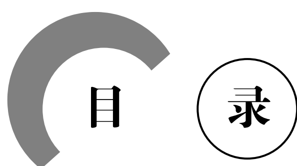
本书的前身是《新编数控编程100例—— 从蓝领走向金领》，是在读者初步具备数控加工工艺、数控编程理论的基础上，通过大量例题的形式，解决零件加工工艺分析与编程思路、编程方法的问题；然后逐步解决编程技巧与工作效率的问题，直至精通数控编程。各例题从零件的加工工艺分析，刀具、夹具、切削用量选用，编程指令格式说明到程序注解等方面进行了详细讲述，做到知识体系完整、严密与实用；R 参数编程与宏程序及其应用作为提高部分体现出高级编程的方法、技巧与效率，具有很高的学术价值。

全书的一百多个实例，绝大多数是作者在中国重大技术装备制造业基地从事数控技术三十多年所完成的产品，经过精心筛选、提炼、创新而形成的，既是工作经验的总结，又有一定的理论高度，体现出作者独到的见解，是该领域最新研究成果，反映了最新研究动态。

在本书的撰写过程中，参阅了大量的文献资料并得到了中国重大技术装备制造业基地等单位的大力支持，特向有关单位及个人表示衷心的感谢！由于水平有限，书中难免出现错误与不妥之处，恳请读者联系指正（邮箱：d_yst@126.com）。

作　者

2015 年 02 月



目　录

前言

第 1 章　SINUMERIK 840D 数控车削编程

1.1　直线插补编程........1
　相关知识点........1
　例 1：带双锥面的阶梯轴的加工........1
　相关知识点........2
　例 2：带圆角的阶梯轴的加工........3
　相关知识点........5
　例 3：带内外轮廓的阶梯轴的编程........6
1.2　阶梯轴的编程........10
　相关知识点........10
　例 1：带圆角阶梯轴的编程........10
　例 2：酒杯外形件的加工........12
　例 3：半轴零件编程........14
1.3　简单圆弧轴类零件的编程........16
　相关知识点........16
　例 1：多段圆弧零件的编程........17
　例 2：曲线方程式连接轴的加工........18
1.4　内轮廓阶梯轴的编程........21
　相关知识点........21
　例 1：内轮廓阶梯轴........23
　相关知识点........24
　例 2：衬套的加工........25
　例 3：液压缸零件加工........26
1.5　复杂外轮廓车削编程........27
　相关知识点........27
　例 1：椭圆短轴的车削........28
　例 2：内、外椭圆弧复合件的编程........31
　例 3：手柄加工程序........33
1.6　带补偿功能的车削编程........36
　相关知识点........36
　例：应用刀具半径补偿功能编写传动轴零件的加工程序........37
1.7　恒螺距螺纹切削........38
　相关知识点........38
　例 1：简单直螺纹的加工........39
　相关知识点........40
　例 2：双线直螺纹的加工........41
　例 3：内、外螺纹的复合零件加工........42
　例 4：外螺纹联接轴的车削加工........43
1.8　恒切削速度编程........45
　例：转子轴的车削加工........45
1.9　子程序调用编程........47
　例 1：内、外螺纹联接头的加工........47
　例 2：车削加工综合实例........49

第 2 章　SINUMERIK 840D 数控铣削编程

2.1　数控加工工艺分析........54
　相关知识点........54
　例 1：平面槽凸轮的数控铣削工艺分析........55
　例 2：链轮的数控铣削工艺分析........57
2.2　直线插补编程........60
　例 1：五角星与五边形加工........60
　例 2：三轴直线插补运动........61
2.3　圆弧插补编程........62
　相关知识点........62
　例 1：六轮圆弧板零件的加工........63
　例 2：平面凸轮铣削........65
2.4　CIP 圆弧插补........68
　相关知识点........68
　例：平面“大头娃”零件轮廓的铣削........69

2.5 TURN 螺旋线插补......71
相关知识点......71
例：漏斗孔的加工......72
2.6 带刀具补偿编程......74
相关知识点......74
例 1：鱼形零件的加工......75
例 2：模板的加工......79
2.7 极坐标编程......81
相关知识点......81
例 1：钻模板的加工......83
例 2：蝙蝠形零件的编程......83
例 3：三角板的数控加工......85
2.8 架构式（FRAME）坐标变换编程......86
相关知识点......86
例 1：平面旋转机座的数控编程......89
例 2：空间旋转机座的数控编程......90
例 3：压力机凸模座的加工......91
例 4：冲床凹模座的加工......92
2.9 比例缩放与镜像编程......98
例 1：蒸汽锤模座的加工......98
例 2：不同象限凸块的加工......99
2.10 孔加工固定循环......100
相关知识点......100
例 1：台阶孔加工......103
例 2：加工呈矩阵排列的孔......105
例 3：槽的固定循环加工......106

第 3 章 FANUC 数控编程

3.1 车削基础编程......111
相关知识点......111
例 1：简单直母线回转零件的车削程序......111
相关知识点......112
例 2：外轮廓圆弧回转件的车削程序......115
例 3：多段直线与圆弧母线回转件车削......116
3.2 车削复合循环编程......118
例 1：活塞套车削程序......118
例 2：手柄的仿形加工......120
例 3：传动轴加工......122
3.3 螺纹加工......123
相关知识点......123
例 1：圆柱直螺纹的加工......123
例 2：传动轴加工......125
相关知识点......127
例 3：内、外螺纹联接轴的加工......128
3.4 内孔车削加工......132
相关知识点......132
例 1：内孔的车削......133
例 2：连接套的车削......134
相关知识点......139
例 3：抛物线内孔加工......141
3.5 铣削基础编程......143
例 1：简单直线圆弧零件轮廓编程......143
相关知识点......144
例 2：平面零件的轮廓铣削及螺纹孔加工......144
3.6 应用刀补进行轮廓编程......146
相关知识点......146
例 1：平面轮廓零件的加工......146
例 2：内、外轮廓零件的加工......147
3.7 固定循环编程......149
相关知识点......149
例 1：孔加工固定循环......150
例 2：支承块的加工......153
相关知识点......156
3.8 坐标变换编程......159
例 1：扇形接合齿的数控加工......159
例 2：拉矫机弧形段上底座的数控加工......163
相关知识点......169
3.9 单件综合编程......169
例 1：斜拉桥桥鞍连接孔的数控加工......169
例 2：辊端接头的加工......173

第 4 章 R 参数编程与宏程序及其应用

4.1 参数与变量编程......185
相关知识点......185
例 1：简单平面件的 R 参数编程......187
例 2：直角坐标方式编写 R 参数加工程序......188

例 3：极坐标方式编写 R 参数加工程序........190
4.2 SINUMERIK 840D 参数编程..........................191
相关知识点..191
例 1：直线平面轮廓 R 参数编程......................191
例 2：内矩形槽 R 参数编程..............................193
例 3：外矩形凸台 R 参数编程..........................195
4.3 程序跳转及程序段重复功能..........................197
例 1：任意正多边形的编程................................197
例 2：内孔 R 参数子程序..................................199
例 3：利用双重循环加工
多圈环形均布孔...200
4.4 平面曲线轮廓加工..201
例 1：直线平面轮廓零件编程............................201
相关知识点..203
例 2：M56 以上大螺纹的旋风铣削....................206
例 3：体育馆看台模型编程................................210
4.5 方程曲线的参数编程......................................213
相关知识点..213
例 1：椭圆方程曲线轮廓 R 参数编程...............214
例 2：抛物线方程曲线轮廓 R 参数编程...........216
例 3：玫瑰花瓣方程曲线轮廓 R 参数编程........217
4.6 立体曲面加工...219
相关知识点..219
例 1：应用宏指令加工空间立体曲面.................220
例 2：立体半椭球的加工....................................223
4.7 FANUC 0I-MB 系统宏指令编程基础...............226
例 1：环切法加工零件轮廓................................226
例 2：铣削链轮轮廓零件....................................228
4.8 内、外球面加工...229
例 1：内球面的铣削加工....................................229
例 2：外球面的铣削加工....................................232
4.9 孔系加工..234
相关知识点..234
例 1：平行孔系的加工..235
例 2：环形阵列孔系的加工................................238
例 3：矩阵均布孔系的加工................................241
相关知识点..243
例 4：大直径斜孔的加工....................................243
4.10 槽系加工..248
相关知识点..248
例 1：滑板润滑油槽的加工................................250
例 2：半圆槽系的加工..252

第 5 章　其他数控系统编程

5.1 广数车削基础编程..255
相关知识点..255
例：传动轴加工工艺分析与编程........................255
5.2 FAGOR 数控系统编程.....................................260
相关知识点..260
例 1：铣削加工平面轮廓零件一........................260
例 2：铣削加工平面轮廓零件二........................262
相关知识点..263
例 3：铣削加工复合零件....................................265
5.3 华中数控编程...271
相关知识点..271
例 1：冷冲压金属模具加工................................271
例 2：异形轴阀芯的加工....................................275
相关知识点..278
例 3：滤芯器组装件的加工................................279

第 6 章　线切割编程

6.1 3B 代码编程..286
相关知识点..286
例 1：无间隙补偿功能外模零件 3B 线
切割编程...288
例 2：有间隙补偿功能 3B 线切割编程..............289
6.2 ISO 代码编程..291
相关知识点..291
例 1：线切割 ISO 代码编程................................292
相关知识点..293
例 2：圆弧内模零件 ISO 线切割编程................294
例 3：内模零件 ISO 线切割编程........................295
例 4：样板的电火花加工....................................295
参考文献...299

第 1 章　SINUMERIK 840D 数控车削编程

1.1　直线插补编程

相关知识点

直线插补指令 G01

执行 G01，可以是单轴直线运动，也可以是两轴直线插补运动，形成平面斜线，还可以三轴直线插补运动，形成空间斜线。

程序格式：

G01 X__　Y__　Z__　F__ ；或

G01 U__　V__　W__　F__ ；

说明：

X、Y、Z：后面的值为终点坐标值。

U、V、W：后面的值是现在点与目标点之间的距离与方向。

F：以 F 给定速度进行切削加工，在无新的 F 指令替代前一直有效。

例 1：带双锥面的阶梯轴的加工

如图 1-1 所示，工件带有两个圆锥面，毛坯尺寸为 ϕ40mm×80mm，材料为 45 钢，分层切除各区域余量，试编写加工程序。

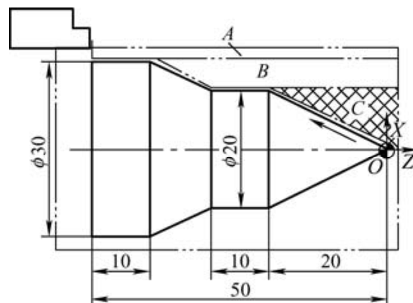


图 1-1　带双锥面的阶梯轴

CHEAN.MPF；	程序号
N05 G95 G90 G40 G71；	程序初始化
N10 T01 D01；	换 1 号刀
N15 M03 S800 F0.15；	切削参数
N20 G00 X100 Z100；	目测刀具位置
N25 X42 Z2；	加工起始位置
N30 G01 X36；	第一次分层切除 *A* 区域余量
N35 Z−50；	
N40 G00 X42 Z2；	
N45 G01 X32；	第二次分层切除 *A* 区域毛坯余量
N50 Z−50；	
N55 G00 X42 Z2；	
N60 G01 X30；	第三次分层切除 *A* 区域毛坯余量
N65 Z−50；	
N70 G00 X42 Z2；	
N75 G01 X26；	第一次分层切除 *B* 区域毛坯余量
N80 Z−30；	
N85 X30 Z−40；	

N90 G00 X42 Z2；
N95 G01 X22；　　第二次分层切除 *B* 区域毛坯余量
N100 Z–30；
N105 X30 Z–40；
N110 G00 X42 Z2；
N150 G01 X20；　　第三次分层切除 *B* 区域毛坯余量
N120 Z–30；
N125 X30 Z–40；
N130 G00 X42 Z2；
N135 G01 X16；　　第一次分层切除 *C* 区域毛坯余量
N140 X20 Z–20；
N145 G00 X42 Z2；
N150 G01 X12；　　第二次分层切除 *C* 区域毛坯余量
N155 X20 Z–20；
N160 G00 X42 Z2；
N165 G01 X8；　　第三次分层切除 *C* 区域毛坯余量
N170 X20 Z–20；
N175 G00 X42 Z2；
N180 G01 X4；　　第四次分层切除 *C* 区域毛坯余量
N185 X20 Z–20；
N190 G00 X42 Z2；
N195 G01 X0；　　第五次分层切除 *C* 区域毛坯余量
N200 X20 Z–20；
N205 G00 X100 Z100；　　程序结束部分
N210 M05 M09；
N215 M30；

点　评

分层切除各区域余量是为了更方便初学者分析、理解切削的过程。在此基础上，可利用相关循环编程，以提高编程效率。

相关知识点

圆弧插补指令 G02、G03

G02 表示按指定进给速度进给的顺时针圆弧插补，G03 表示按指定进给速度进给的逆时针圆弧插补。圆弧顺时针、逆时针方向的判别方法是：沿着不在圆弧平面内的坐标轴，由正方向向负方向看去（视角方向：刀具轴的负向），顺时针方向为 G02，逆时针方向为 G03，基本圆弧插补指令主要是指半径编程与圆心（I、J、K）编程方式。

在 XY 平面内：

G17　G02/G03　X__　Y__　I__　J__　F__ ；

G17　G02/G03　X__　Y__　CR=__　F__ ；

说明：

I=圆心的 *X* 坐标–圆弧起点的 *X* 坐标。

J=圆心的 *Y* 坐标–圆弧起点的 *Y* 坐标。

K=圆心的 *Z* 坐标–圆弧起点的 *Z* 坐标。

在 SINUMERIK 802D 系统中，半径的尺寸字地址用“CR=”方式，FANUC 数控系统半径用 R 表示，当地址是一个字母时，地址与数字之间可以有赋值号，也可省略，如 X=5 或 X5；当地址由两或两个以上字母构成时，地址与数字之间必须有赋值号，如 CR=20 是正确的，写 CR20 就不正确了。

例 2：带圆角的阶梯轴的加工

如图 1-2 所示，工件为带圆角的阶梯轴，毛坯尺寸为ϕ50mm×100mm，材料为 45 钢，试进行加工工艺分析并编写加工程序。

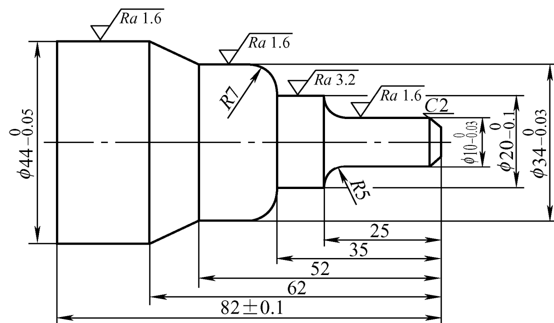


图 1-2　带圆角的阶梯轴

1. 加工工艺分析

先根据图样要求分析该零件的数控加工工艺，该零件的外圆形状较为复杂，由锥面、端面、圆弧和圆柱面组成，尺寸都为自由尺寸，根据毛坯尺寸和零件的最后要求，可采用以下两种方法加工：

1）先车一端面，钻中心孔，然后夹另一端，采用一夹一顶的方法，保证车削长度大于 82mm，将工件的所有尺寸车出，最后夹ϕ34mm 外圆处，找正ϕ44mm 外圆，车端面，保证工件的总长 82mm。这种方法适用于对几何精度（如同轴度）要求较高的工件。

2）先车一端面，同时车ϕ44mm 外圆，车削长度保证 50mm 左右，调头车端面，保证工件的总长为 82mm，钻中心孔，然后取下工件，夹ϕ44mm 外圆，采用一夹一顶的方法，车削工件右端各部尺寸。

注意：为避免夹伤，应垫铜皮，同时夹持长度为 5～10mm。

2. 工件的装夹

在用自定心卡盘装夹工件时，注意精基准面应垫铜皮，在采用一夹一顶的方法加工时，注意夹持长度不能太长，否则将形成过定位，同时应调整尾座的锥度，使之和主轴同轴。

3. 确定数控加工工序

1）车端面，刀具选用端面车刀。

2）粗、精车工件左端（ϕ44mm 外圆），刀具选用 90° 外圆粗车刀和 90° 外圆精车刀。

3）车端面，保证总长，钻中心孔，刀具选用端面车刀。

4）采用一夹一顶的方法车工件右端，保证各部尺寸，刀具选用 90° 外圆粗车刀和 90° 外圆精车刀。

5）选择进给量，编制数控加工工序卡片。各道工序间进给量的选择如下：粗车时

n=700r/min，a_p=1.5mm，f=0.3mm/r，留精加工余量 0.3mm；精车时 n=1500r/min，a_p=0.15mm，f=0.1mm/r。数控加工工序卡片见表 1-1。

表 1-1　数控加工工序卡片

工　序	切削参数				刀　具
	进给量 f/（mm/r）	背吃刀量 a_p/mm	转速 n/（r/min）	余量/mm	
车左端面	0.3	端面见光	700		T01
精车左端外圆	0.1	0.15	1 500		T03
车右端面，定总长	0.3	1.5	700		T01
粗车右端外圆	0.3	1.5	700	0.3	102
精车右端外圆	0.1	0.15	1 500		T03

4. 编制程序

坐标原点设在工件的右端面，以装夹在卡盘上的位置为准。

```
ZUODUAN.MPF；
N05 G54 G90 G95 G00 X150 Z150；        建立坐标系，快速移动到安全点
N10 M03 S1500；                        主轴以 1500r/min 正转
N15 M08；                              开切削液
N20 T03 D03；                          换 3 号刀，3 号刀具补偿（简称刀补）
N25 G00 X44 Z2；                       快进至起刀点
N30 C01 Z−50 F0.1；                    车外圆
N35 G00 X150 Z150；                    快速返回安全点
N40 M02；                              程序结束
```

车工件右端外圆

```
YOUDUAN.MPF；                          程序名
N05 G54 G90 G95 G00 X150 Z5；          初始化程序，快速移动到安全点
N10 M03 S1500；                        主轴以 1500r/min 正转
N15 M06 T02 D02；                      换 2 号刀，调 2 号刀补
N20 G96 S150 LIMS=1500；               主轴以恒线速度 150m/min 进给
N25 CNAME="TESKI"；                    调用轮廓加工子程序
N30 R105=9 R106=0.3 R108=1.5；         设置坯料切削循环参数
N35 R109=7 R110=1 R111=0.3 R112=0.1；
N40 LCYC95；                           调用坯料切削循环粗加工
N45 G00 X150 Z5；
N50 M02；
```

轮廓加工子程序

```
TESK1.SPF；                            子程序名
N05 G00 X4.522；
N10 G00 X6；                           精加工轮廓起始行，到倒角延长线
N15 G01 Z0 F0.1；                      慢速走到切削起点，定义精车进给量
N20 X10 Z−2；                          精加工倒角 C2mm
N25 Z−20；                             精加工φ10mm 外圆
N30 G02 X20 Z−25 CR=5；                精加工 R5mm 圆弧
N35 C01 Z−35；                         精加工φ20mm 外圆
N40 G03 X34 Z−42 CR=7；                精加工 R7mm 圆弧
```

```
N45 C01 Z-52;                  精加工φ34mm 外圆
N50 X44 Z-62;                  精加工外圆锥
N55 M17;                       子程序结束
```

点　评

轮廓加工子程序 TESK1.SPF 即为轮廓精加工程序，相当于 FANUC 数控系统 G71 程序段中 P、Q 之间的加工内容。

G71 U(Δd) R(e);

G71 P(ns) Q(nf) U(Δu) W(Δw) F(f) S(s) T(t);

相关知识点

1. 切槽循环指令 CYCLE93

CYCLE93（SPD，SPL，WIDG，DIAG，STA1，ANG1，ANG2，RCO1，RCO2，RCI1，RCI2，FAL1，FAL2，IDEP，DTB，VRTI），各参数见表 1-2。

2. 毛坯切削（轮廓）粗车循环指令 CYCLE95

CYCLE95（NPP，MID，FALZ，FZLX，FAL，FF1，FF2，FF3，VARI，DT，DAM，VRT），各参数见表 1-3。

3. 螺纹切削循环指令 CYCLE97

CYCLE97（PIT，MPIT，SPL，FPL，DM1，DM2，APP，ROP，TDEP，FAL，IANG，NSP，NRC，NID，VARI，NVMT），各参数见表 1-4。

表 1-2　切槽循环指令 CYCLE93（SINUMERIK 802D）　　（单位：mm）

参　数	意　义	本 例 取 值
SPD	切槽起始点直径	30
SPL	切槽起始点 *Z* 坐标（切槽刀的左刀点）	−28
WIDG	槽底宽度	8
DIAG	槽的最大深度	2
STA1	槽的斜线角	0
ANG1	右侧面角	0
ANG2	左侧面角	0
RCO1	槽沿倒角，位于起始点的一边	0
RCO2	槽沿另一倒角	0
RCI1	槽底倒角，位于起始点的一边	0
RCI2	槽底另一倒角	0
FAL1	槽底精加工余量	0.2
FAL2	槽侧面精加工余量	0.1
IDEP	切槽进给量最大值	1.5
DTB	槽底停顿时间	1
VRTI	加工类型（纵向、外部、右边）	5

表 1-3　毛坯切削（轮廓）循环指令 CYCLE95（SINUMERIK 802D）　（单位：mm）

参　　数	意　　义	本 例 取 值
NPP	轮廓子程序名称	CXL
MID	最大粗加工背吃刀量（无符号输入）	2
FALZ	沿纵向轴（*Z* 向）的精加工余量（无符号输入）	0.2
FZLX	沿横向轴（*X* 向）的精加工余量（无符号输入），半径量	0.3
FAL	沿轮廓的精加工余量（无符号输入）	0.5
FF1	非退刀槽加工的进给速度	200mm/min
FF2	进入凹凸切削时的进给速度	50mm/min
FF3	精加工的进给率	100%
VARI	加工类型，数值：1～12	1
DT	粗加工时，用于断屑的停顿时间	0
DAM	粗加工因断屑而中断时所经过的路径长度	0
VRT	退刀行程，增量，*X* 向为半径（无符号），即刀具在粗加工中，每车削完一层后，在 *X* 向与 *Z* 向同时退回“VRT”距离，默认为 1mm	2

表 1-4　螺纹切削循环指令 CYCLE97（SINUMERIK 802D）　（单位：mm）

参　　数	意　　义	本 例 取 值
PIT	螺纹导程	1.5
MPIT	用螺纹公称直径来表示螺距	0
SPL	螺纹起始点的纵坐标	0
FPL	螺纹终点的纵坐标	–20
DM1	起始点螺纹直径	30
DM2	终点螺纹直径	30
APP	空刀导入量	3
ROP	空刀退出量	3
TDEP	螺纹深度	0.93
FAL	精加工余量（半径值）	0.05
IANG	切入进给角	0°
NSP	首牙螺纹的起始点偏移	0
NRC	粗加工切削次数	6
NID	停顿时间	1s
VARI	螺纹的加工类型	1
NVMT	螺纹线数	1

例 3：带内外轮廓的阶梯轴的编程

编制图 1-3 所示零件的加工程序，材料为 45 钢，棒料直径为 40mm。

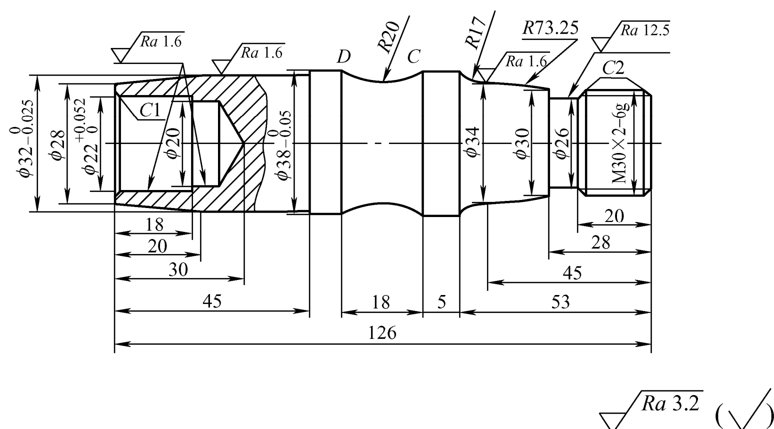


图 1-3　带内外轮廓的阶梯轴

1. 工艺路线

1）夹右端，手动车左端面，用ϕ20mm 麻花钻钻ϕ20mm 底孔。

2）用 1 号外圆车刀、LCYC95 轮廓循环粗、精车左端外形轮廓。

3）用 4 号内孔镗刀镗ϕ22mm 内孔。

4）调头夹ϕ32mm 外圆，用 1 号外圆车刀车右端面，车至总长，用 LCYC95 轮廓循环粗、精车右端外形轮廓。

5）用 2 号切槽刀、LCYC93 切槽循环切ϕ26mm 螺纹退刀槽，并倒角 *C*2mm。

6）用 3 号螺纹刀、LCYC97 螺纹车削循环车 M30×1.5 螺纹。

2. 刀具选择

T01——93°外圆车刀。

T02——切槽刀（刀具宽度为 4mm，对刀点为切槽刀的左刀点）。

T03——60°外螺纹车刀。

T04——内孔镗刀。

3. 编制程序

（1）左端加工主程序　程序如下：

```
ZUODUAN.MPF；
N05 DEF REAL MID=2, FAL1=0.2, FALX=0.3, FAL=0.15, FF1=200；
                                              DEF：定义
N10 DEF REAL FF2=50, FF3=100, VARI=1, DT=0, DAM=0, VRT=2；
                                              REAL：实数
N15 G94 G90；                                 采用绝对值编程，进给单位为 mm/min
N20 TRANS X0 Z62；                            采用编程零点偏移
N25 M03 S600；                                主轴正转，转速为 600r/min
N30 T01 D01 M08；                             换 1 号外圆车刀，1 号刀补，切削液开
N35 G00 X45 Z0；                              快速进刀
N40 G01 X18 F30；                             车端面
N45 G00 X40 Z2；                              快速退刀，准备调用 CYCLE（95）轮廓加工循环
```

N50 CYCLE95(“ZOU”，MID，FALZ，FZLX，FAL，FF1，FF2，FF3，VARI，DT，DAM，VRT)；	
	N50 中的各参数已通过 N05、N10 DEF REAL 赋值确定了，一是不会再因填错数据而犯愁，二是使修改参数变得容易了
N55 MOO；	程序暂停
N60 S1200 T01 D01 F50；	主轴变速，转速为 1200r/min
N65 WXY；	调用 WXY 子程序精车左端轮廓
N70 G00 X100 Z100；	快速退刀
N75 M06 T04 D04；	换 4 号外圆车刀，4 号刀补
N80 S600 F100；	转速为 600r/min
N85 G00 X21.5；	快速进刀
N90 Z2；	快速进刀
N95 G01 Z−18；	粗车ϕ2mm 内孔
N95 X18；	退刀
N100 G0 Z2；	快速退刀
N105 S650 F50；	主轴变速，转速为 650r/min
N110 G01 X24 Z0；	进刀
N115 X22.026 Z−1；	倒角
N120 Z−18；	精车ϕ22mm 内孔至尺寸
N125 X18；	退刀
N130 G00 Z100；	快速退刀
N135 X100；	快速退刀
N140 M05 M09；	主轴停转，切削液关
N145 M02；	程序结束

（2）左端加工子程序　程序如下：

ZOU.SPF；	左端加工子程序名
N10 G01 X28 Z0；	进刀
N20 X31.99 Z−20；	精车锥体
N30 Z−45；	精车ϕ32mm 外圆至尺寸
N40 X38；	退刀
N50 Z−55；	精车ϕ38mm 外圆
N60 X40；	退刀
N70 M17；	子程序结束

（3）右端加工主程序　程序如下：

YOUUAN.SPF；	右端加工子程序名
N05 DEF REAL MID=2, FAL1=0.2, FALX=0.3, FAL=0.5, FF1=200；	
	DEF：定义
N10 DEF REAL FF2=50, FF3=100, VARI=1, DT=0, DAM=0, VRT=2；	
	REAL：实数
N05 G94 G90；	采用绝对值编程，分进给
N10 TRANS X0 Z60；	采用编程零点偏移
N15 M03 S600 T01 D01；	换 1 号外圆车刀，1 号刀补
N20 G00 X42 Z0 M08；	快速进刀
N25 G01 X−1；	F100 车端面（取总长）
N30 G00 X40 Z2；	快速退刀
N35 CYCLE95(“YOU”, MID, FALZ, FZLX, FAL, FF1, FF2, FF3, VARI, DT, DAM, VRT)；	
	N35 中的各参数已通过 N05、N10 DEF REAL 赋值确定了

N40 S1200 F50；	主轴变速，转速为 1200r/min
N45 YOU；	调用 YOU 子程序精车右端轮廓
N50 G00 X100 Z100；	快速退刀
N55 T02 D02 S450 F50；	换 2 号外圆车刀，2 号刀补
N60 G00 X32 Z–24；	快速进刀

N65 CYCLE93(　30,　–24,　8,　2,　0,　0,　,　0, 0, 0, 0, 0.1, 0.1, 1, 2, 5)；

CYCLE93（SPD，SPL，WIDG，DIAG，STA1，ANG1，ANG2，RCO1，RCO2，RCI1，RCI2，FAL1，FAL2，IDEP，DTB，VRTI）中各参数一定要对号入座，有 16 个参数要与 N65 一一对应，一旦不能对号入座填错数据就很麻烦，如“2”到“0.1”之间，就有 7 个“0”，这就极易出错，且要修改参数也不容易

N70 T02 D02；	换 2 号外圆车刀，2 号刀补
N75 G00 X32；	退刀
N80 Z–18；	退刀
N85 G01 X30；	进刀
N90 X26 Z–20；	倒角 *C*2mm
N95 X32；	退刀
N100 G00 X100 Z100；	快速退刀
N105 T03 D03 S600；	换 3 号外圆车刀，3 号刀补
N110 G00 X30 Z2；	快速进刀

N115 CYCLE97 （ 1.5,　0,　0,　–20,　30,　30,　3,　3,　0.93,　0.05, 0, 0, 6, 1, 1,)；

CYCLE97（PIT，MPIT，SPL，FPL，DM1，DM2，APP，ROP，TDEP，FAL，IANG，NSP，NRC，NID，VARI，NVMT）中各参数一定要对号入座，有 16 个参数要与 N115 一一对应

N120 G00 X100 Z100；	快速退刀
N125 M05 M09；	主轴停转，切削液关
N130 M02；	程序结束

（4）右端加工子程序

YOU.SPF；	右端加工子程序名
N05 G01 X26 Z0；	进刀
N10 X29.8 Z–2；	倒角 *C*2mm
N15 Z–28；	精车 M30×1.5 的外圆
N20 X30；	退刀
N25 G03 X34 Z–45 CR=73.25；	精车 *R*73.25mm 圆弧
N30 G02 X38 Z–53 CR=17；	精车 *R*17mm 圆弧
N35 G01 X40；	退刀
N40 RET；	RET 子程序结束并返回程序开头，也可以用 M17，但 M17 仅为结束命令

点　评

各参数均采用 DEF 赋值方式确定，一是不会再因填错数据而犯愁，二是使修改参数变得容易了。如：CYCLE95 循环指令轮廓加工子程序 ZUO.SPF、YOU.SPF 即为轮廓精加工程序、LCYC93 切槽循环切ϕ26mm 螺纹退刀槽、LCYC97 螺纹车削循环车 M30×1.5 螺纹，它们中的各参数均采用了 DEF 赋值方式确定，以避免 CYCLE××中的各参数因不能对号入座出现填空错误，若要修改参数，可直接从 DEF 赋值中进行。

1.2 阶梯轴的编程

相关知识点

倒角/倒圆指令 CHF=__/RDN=__

在一个零件的加工过程中，经常会出现倒角或倒圆，此时利用 SIEMENS 系统的指令 CHF=或者 RND=与加工拐角的轴运动指令一起编程，可很方便地实现倒角、倒圆加工，如图 1-4 所示。

倒角 CHF=：直线轮廓之间、圆弧轮廓之间以及直线轮廓和圆弧轮廓之间切入一直线并倒去棱角。

倒圆 RND=：直线轮廓之间、圆弧轮廓之间以及直线轮廓和圆弧轮廓之间切入一圆弧，圆弧与轮廓进行切线过渡。

如果其中一个程序段轮廓长度不够，则在倒圆或倒角时会自动削减编程值。几个连续编程的程序段中有不含坐标轴移动指令的程序段，则不可以进行倒角或倒圆，其编程格式为：

CHF=__；　　插入倒角，数值表示倒角长度

RND=__；　　插入倒圆，数值表示倒圆半径

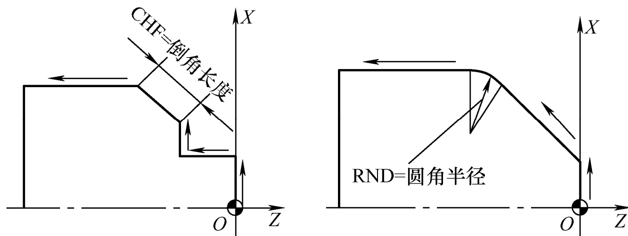


图 1-4　G01 倒角/倒圆

例 1：带圆角阶梯轴的编程

1. 工艺分析

（1）建立工件坐标系　如图 1-5 所示，对于卧式数控车床，工件原点通常设在工件的右端面中心上，编程、对刀比较方便。

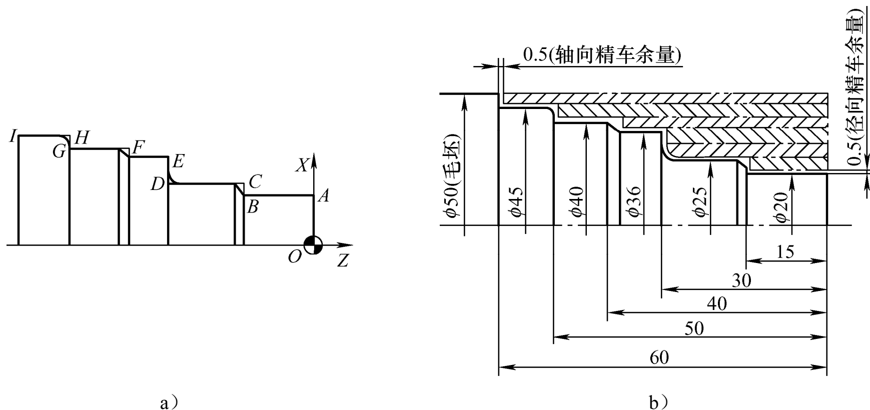


图 1-5　带圆角阶梯轴的编程

a）工件坐标系　b）加工方案

（2）确定加工方案　用 93° 复合压紧式可转位外圆左手（偏）车刀 T01 进行粗、精加工。粗加工从大头到小头分段加工，精加工从小头到大头连续轮廓车削。粗加工时，留出径向精车余量 1mm（单边 0.5mm），轴向精车余量 0.5mm，刀具轴向进给 6 次完成粗加工。精车一刀完成，工件右端面在对刀时手动车出，不留加工余量。

2. 编制程序

程序如下：

```
GTRONG.MPF；
N05 G54 C90 G23 G95；                    加工状态初始化
N10 G75 X0 Z0；                          换刀点
N15 M06 T01；                            换刀 T01，导入刀具数据
N20 S680 M04 F0.15；                     后置刀架，主轴反转，刀片正装
N25 G00 X46 Z5；                         快速接近工件，完成刀补
N30 G01 Z−59.5；                         粗车外圆柱面至φ46mm
N35 X52；                                车削台阶
N40 G00 Z5；                             快速退至工件右端
N45 G00 X41；                            径向进刀
N50 G01 Z−49.5；                         粗车外圆柱面至φ41mm
N55 X46；
N60 G00 Z5；
N65 G00 X37；                            径向进刀
N70 G01 Z−37.5；                         粗车外圆柱面至φ37mm
N75 X41；
N80 G00 Z5；
N85 G00 X31；                            径向进刀
N90 G01 Z−29.5；                         粗车外圆柱面至φ31mm
N95 X37；
N100 G00 Z5；
N105 G00 X26；                           径向进刀
N110 G01 Z−27；                          粗车外圆柱面至φ26mm
N115 G02 X31 Z−29.5 CR=2.5；
N120 G00 Z5；
N125 G00 X21；                           径向进刀
N130 G01 Z−14.5；                        粗车外圆柱面至φ21mm
N135 G01 X26；
N140 G00 Z5；
N145 G00 X20 Z5 F0.1 S810 M04；          精车下刀点（20，5），变速、变进给量
N150 G01 Z−15；                          直线插补到 B 点
N155 X25 CHF=1.414；                     车端面和 C 点倒角 C1mm
N160 Z−30 RND=3；                        车φ25mm 外圆和 D 点倒圆 R3mm
N165 X36；                               直线插补到正点车端面
N170 Z−38；                              车φ36mm 外圆
N175 X40 Z−40；                          F 点倒角
N180 Z−50；                              车φ40mm 外圆到 C 点
N185 X45 RND=2；                         H 点倒圆 R2mm
N190 Z−60；                              直线插补到 I 点
N195 X52；                               抬刀，高度要大于φ50mm 毛坯
N200 G75 X0 20；                         返回换刀点
N205 M30；                               主程序结束
```

例 2：酒杯外形件的加工

酒杯外形如图 1-6a 所示，是以外轮廓作为回转母线，绕回转轴旋转一周而形成的，其外形轮廓的各点坐标如图 1-6b 所示，外形轮廓上六个槽的尺寸如图 1-7 所示，槽宽均为 2mm，毛坯为ϕ65mm×110mm 的长棒料，材料 45 钢，编写车削加工程序。

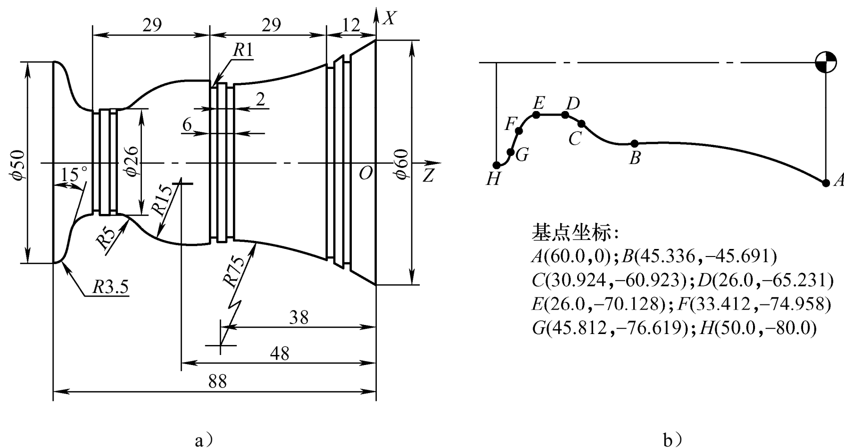


图 1-6　酒杯

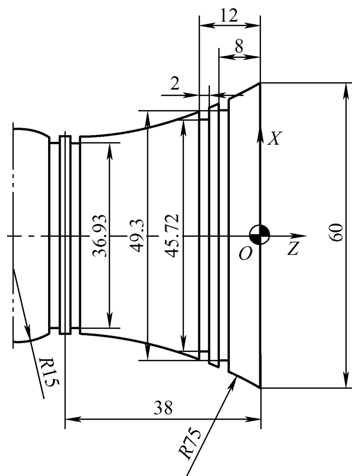


图 1-7　酒杯外形轮廓各槽尺寸

1．工艺分析

加工该件时，采用一次装夹加工完成，工件外伸长度到 86mm，选用 35°菱形机夹车刀，其主偏角为 93°，副偏角为 52°。调用酒杯外形轮廓子程序（JIU）加工外轮廓之后，再加工六个槽（从右起向左为第一个槽），最后直接用切断刀切断。

2．编制程序

程序如下：

```
JIUBEIWAI.MPF;                    加工酒杯外形右阶梯轴主程序
N05 G90 G95 G40 G71;
N10 T01 D01;
```

```
N15 M03 S800 F0.1 M08;
N20 G00 X62 Z2;                         调用酒杯外形轮廓子程序 JIU
N25 CYCLE95( "JIU",   1,   0,   0.3,   , 0.1, 0.1, 0.05,   9,   ,   , 0.5);
```

CYCLE95(NPP , MID, FALZ, FZLX, FAL, FF1, FF2, FF3, VARI, DT, DAM, VRT)中各参数一定要对号入座，有 12 个参数要与 N25 一一对应，FAL、DT、DAM 之处的逗号个数既不能少，也不能多

```
N30 T02 D02;                            选用带 R1mm 圆角、宽 2mm 的成形切槽刀
N35 G00 X6;
N40 G00 Z−8;                            快进至第一个槽（从右起向左）的位置
N45 G01 X49.3 F0.06;                    切第一个槽
N50 G04 X0.5;                           暂停 0.5s
N55 G00 X55;                            退刀
N60 G00 Z−12;                           快进至第二个槽的位置
N65 G01 X45.72 F0.06;                   切第二个槽
N70 G04 X0.5;                           暂停 0.5s
N75 G00 X55;                            退刀
N80 G00 Z−37;                           快进至第三个槽的位置
N85 G01 X36.93 F0.06;                   切第三个槽
N90 G04 X0.5;                           暂停 0.5s
N105 G00 X55;                           退刀
N110 G00 Z−41;                          快进至第四个槽的位置
N115 G01 X36.93 F0.06;                  切第四个槽
N120 G04 X0.5;                          暂停 0.5s
N125 G00 X55;                           退刀
N130 G00 Z−66;                          快进至第五个槽的位置
N135 G01 22 F0.06;                      切第五个槽
N140 G04 X0.5;                          暂停 0.5s
N145 G00 X55;                           退刀
N150 G00 Z−70;                          快进至第六个槽的位置
N155 G01 X22 F0.06;                     切第六个槽
N160 G04 X0.5;                          暂停 0.5s
N165 G00 X65;                           退刀
N170 Z100;
N175 M30;

JIU.SPF;                                外形轮廓子程序
N05 G01 X60 Z0;                         进刀至工件右端 A 点
N10 G02 X45.336 Z−45.691 CR=75;         加工 R75mm，进刀至 B 点
N15 G03 X30.924 Z−60.923 CR=15;         加工 R15mm，进刀至 C 点
N20 G02 X26 Z−65.231 CR=5;              加工 R5mm，进刀至 D 点
N25 G01 Z−70.128;                       加工直线段，进刀至 E 点
N30 G02 X33.412 Z−74.958 CR=5;          加工 R5mm，进刀至 F 点
N35 G01 X45.812 Z−76.619;               加工直线段，进刀至 G 点
N40 G03 X50 Z−80 CR=3.5;                加工 R3.5mm，进刀至 H 点
N45 G01 Z−86;                           工件延长到 86mm，毛坯余量足够
N50 X62;                                退刀
N55 RET;                                RET 子程序结束并返回程序开头，也可用 M17，但 M17
                                        仅为结束命令
```

点　评

酒杯外形的加工综合应用了前面几个例题中的 G01、G02、G03 及 CYCLE××循环指令，完成了比较复杂的轮廓编程，重点还是 CYCLE××中各参数一定要对号入座，空缺的参数（FAL、DT、DAM）也要用逗号表示出来，逗号的个数既不能少，也不能多！

例 3：半轴零件编程

零件图如图 1-8 所示，材料为 45 钢，毛坯尺寸为ϕ130mm×85mm，毛坯调质硬度为 200～220HBW，编写车削加工程序。

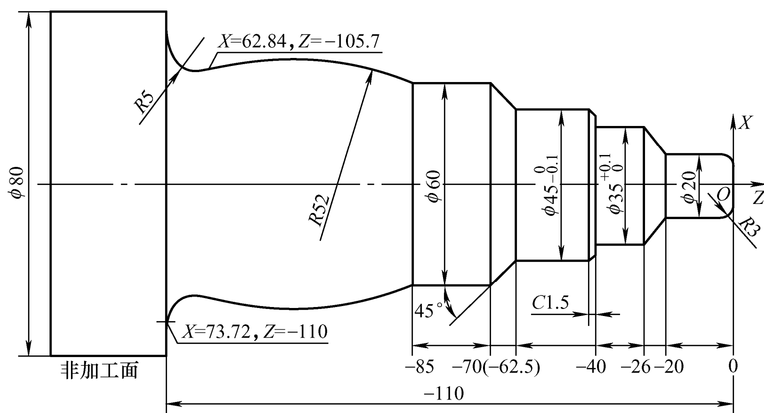


图 1-8　半轴零件

1. 工艺分析

该件为长轴零件，因毛坯直径大于ϕ50mm，不能将毛坯伸入机床主轴孔中，采用一次装夹完成工件的加工，编程用两种方案。

2. 编程

方案一：基本编程

程序如下：

HENXIAN1.MPF;	恒线速车削例子
N05 G00 G54 S300 M03 M06 T01;	选择刀具，设定工艺数据
N10 G00 G96 S50 LIMS=3000 F0.3;	设定粗车恒线速度，最高速度为 3000r/min
N15 G00 X85 Z0.2;	快速进刀至接近工件，准备粗车端面
N20 G01 X−2;	粗车端面，留余量 0.2mm
N25 G00 X75 Z1;	退刀，准备切外圆
N30 G01 Z−65.7;	粗切外圆第一刀至ϕ75mm
N35 X80;	径向退刀切出
N40 G00 Z1;	轴向返回
N45 X61;	径向进刀
N50 G01 Z−85;	粗切外圆第二刀至ϕ61mm
N55 X65;	径向退刀切出
N60 G00 Z1;	轴向返回
N70 G00 X52 Z1;	退刀，准备切外圆

N75 G01 Z−65.7；	粗切外圆第三刀至ϕ52mm
N80 X62；	径向退刀切出
N85 G00 Z1；	轴向返回
N90 G01 Z−62.4；	粗切外圆第四刀至ϕ45.4mm
N95 X60.5 Z=70；	45°锥面余料切削
N100 G00 Z1；	轴向返回
N105 X35.4；	径向进刀
N110 G01 Z−39.8；	粗切外圆第五刀至ϕ35.4mm
N115 X46；	径向退刀切出
N120 G00 Z1；	轴向返回
N125 X28；	径向进刀
N130 G01 Z−22.9；	粗切外圆第六刀至ϕ28mm
N135 X36；	径向退刀切出
N140 G00 Z1；	轴向返回
N145 X20.4；	径向进刀
N150 G01 Z−9.9；	粗切外圆第七刀至ϕ20.4mm
N155 X35.5 Z−26；	锥面余料切削
N160 G00 Z1；	轴向返回
N165 X10；	径向进刀
N170 G01 Z0.2；	轴向进刀
N175 G03 X20.4 Z−5 CR=3.2；	粗切 *R*5mm 圆弧至 *R*3.2mm
N180 G00 Z1；	轴向返回
N185 G00 G96 S80 LIMS=3000 F0.15；	设定精车恒线速度
N190 G00 X−2；	径向进刀
N195 G01 Z0；	轴向进刀
N200 X10；	精车端面
N205 G03 X20 Z−5 CR=3；	精车 *R*3mm
N210 G01 Z−20；	精车ϕ20mm
N215 X35.05 Z−26；	精车锥面
N220 Z−40；	精车ϕ35mm
N225 X44.95 CHF=1.5*1.414；	倒角
N230 Z−62.5；	精车ϕ45mm
N235 X60 Z−70；	精车锥面
N240 Z−85；	精车ϕ45mm
N245 G03 X62.84 Z−105.7 CR=52；	精车 *R*52mm 外圆
N250 G02 X73.72 Z−110 CR=5；	精车过度圆弧
N255 G01 X85；	精车 110mm 台阶端面
N260 G00 Xl00 Z150 M09；	快速退刀，关冷却
N265 M30；	程序结束

方案二：循环编程（特点：程序简洁）

程序如下：

HENXIAN2.MPF；	主程序，采用循环编程
N10 G00 G54 S300 M03 M06 T01；	选择刀具，设定工艺数据
N20 G00 G96 S50 LIMS=3000 F0.3；	恒线速度，最高转速为 3000r/min
N30 G00 X65 Z0.2 M08；	快速引刀接近工件，准备粗车端面
N40 G01 X−2；	粗车端面
N50 G00 X65 Z2；	退刀
N60 G00 G96 S80 LIMS=3000 F0.15；	设定精车端面恒线速度

```
N70 G00 Z0;                              进刀
N80 G00 X-2;                             精车端面
N90 G00 X65 Z20;                         退刀
N100 G00 G96 S50 LIMS=3000 F0.3;         设定粗车轮廓恒线速度
N110 CNAME="LK1";                        调用轮廓加工子程序
N120 R105=1 R106=0.2 R108=4 R109=0 R110=2 R111=0.3 R112=0.15;
                                         循环参数设定
N130 CYCLE95(NPP,MID,FALZ,FZLX,FAL,FF1,FF2,FF3,VARI,DT,DAM,VRT);
                                         各参数一定要对号入座，12 个参数要一一对应，FAL，DT，
                                         DAM 之处的逗号个数既不能少，也不能多！
N140 G00 G96 S80 LIMS=3000 F0.15;        设定精车轮廓恒线速度
N150 R105=5;                             改变循环参数
N160 LCYC95;                             再次调用 LCYC95 循环精加工轮廓
N170 G00 X100 Z150 M09;                  快速退刀，关切削液
N180 M30;                                程序结束

LK1.SPF;                                 轮廓加工子程序
N05 G01 X10 Z0;                          轮廓起点
N10 G03 X20 Z-5 CR=5;                    车 R5mm 圆弧轮廓
N15 G01 Z-20;                            圆柱轮廓
N20 X35.05 Z-26;                         车圆锥轮廓
N25 Z-40;                                车φ35mm 圆柱轮廓
N30 X44.95 CHF=1.5*1.414;                程序中的乘号只能用“*”，不能用“×”或“·”
N35 Z-62.5;                              车φ45mm 圆柱轮廓
N40 X60 Z-70;                            车圆锥轮廓
N45 Z-85;                                精车φ60mm
N50 G03 X62.84 Z-105.7 R52;              精车 R52mm 外圆
N50 G02 X73.72 Z-110 R5;                 精车过渡圆弧
N60 G01 X85;                             精车 110mm 台阶面
N65 RET;                                 子程序结束
```

点　评

方案一采用的是基本编程，很适合于初学者，但程序较长；方案二采用的是循环编程，程序很简洁。

上述几个例子均采用了循环编程，若能掌握，编程就很方便，其关键是 CYCLE×× 中各参数一定要对号入座，空缺的参数（FAL、DT、DAM）也要用逗号表示出来，逗号的个数既不能少，也不能多，这一点很重要！

1.3　简单圆弧轴类零件的编程

相关知识点

车床是在 *OZX* 平面内加工圆弧的。程序格式：

```
G18 G02/G03  X__  Z__  I__  K__  F__ ;
G18 G02/G03  X__  Z__  CR=__  F__ ;
```

例 1：多段圆弧零件的编程

如图 1-9 所示，工件由多段圆弧构成，材料为 45 钢，毛坯尺寸为 ϕ60mm×100mm，先根据图样要求分析该零件的数控加工工艺（工件的装夹、刀具的选用、切削用量的选择），然后再编制加工程序。

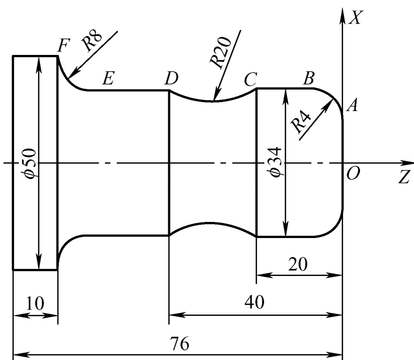


图 1-9　多段圆弧零件

1. 图样分析

该零件的外圆形状较复杂，由两段外圆弧、端面、倒圆等组成，尺寸都为自由尺寸，根据毛坯尺寸和零件的最后要求，可采用以下两种方法加工：

1）先车一端面，钻中心孔，调头夹另外一端，采用一夹一顶的方式，保证车削长度大于 76mm，将工件的所有尺寸车出，最后夹右端 ϕ34mm 外圆，按 ϕ34mm 外圆打表找正工件，车端面，保证工件的总长 76mm。这种方法适用于对几何精度（如同轴度）要求较高的工件。

2）一次装夹完成工件全部加工，保证工件的总长 76mm，最后切断。这种方法适用于毛坯较长的情况。

2. 工件的装夹

工件采用自定心卡盘装夹，调头装夹时，应注意：在精基准面上应垫铜皮，在采用一夹一顶的方法加工时，注意夹持长度不能太长，否则将形成过定位，同时应调整尾座的锥度和主轴同轴。

3. 确定数控加工工序

1）车端面，刀具选用端面车刀。

2）粗、精车工件左端 ϕ34mm 的外圆，刀具选用 90°外圆粗车刀和 90°外圆精车刀。

3）车端面，保证总长，钻中心孔，刀具选用端面车刀。

4）采用一夹一顶的方法车工件右端，保证各部尺寸，刀具选用 90°外圆粗车刀和 90°外圆精车刀。

5）选择进给量。各工步进给量的选择：粗车时 n=700r/min，a_p=1.5mm，f=0.3mm/r，留精加工余量 0.3mm；精车时 n=1500r/min，a_p=0.15mm，f=0.1mm/r。

4. 坐标原点设定

坐标原点设定在工件的右端面。

5. 编制程序

程序如下：

```
LQW12.MPF;                          程序名
N05 G90 G54;                        X 轴为直径数据方式
N10 G00 X60 Z50 S500 M03;           起刀点
N15 T01 D01;                        选择 1 号刀具，1 号刀具补偿
N20 X0 Z5;                          刀具快速接近工件
N25 G01 X0 Z0 F100;                 进给开始切入工件
```

```
N30 X26;                           车端面
N35 G03 X34 Z-4 CR=4 F50;          车R4mm圆角A—B
N40 G01 Z-20;                      车外圆B—C
N45 G02 X34 Z-40 CR=20;            车R20mm圆弧C—D
N50 G01 Z-58;                      车外圆D—E
N55 G02 X50 Z-66 CR=8;             车R8mm圆角E—F
N60 G01 X55 M05;                   出刀
N65 G00 X60 Z50;                   退刀到起点
N70 M30;                           程序结束
```

点　评

这是车床上最基本的圆弧编程方法，与前面的几个例题类似，图中 N45 直接用半径编程很方便，若用 I、J 编程，其计算可应用几何关系及三角函数。

例 2：曲线方程式连接轴的加工

如图 1-10 所示，工件材料为 45 钢，毛坯尺寸为ϕ60mm×120mm，先根据图样要求分析该零件的数控加工工艺，然后再编制加工程序。

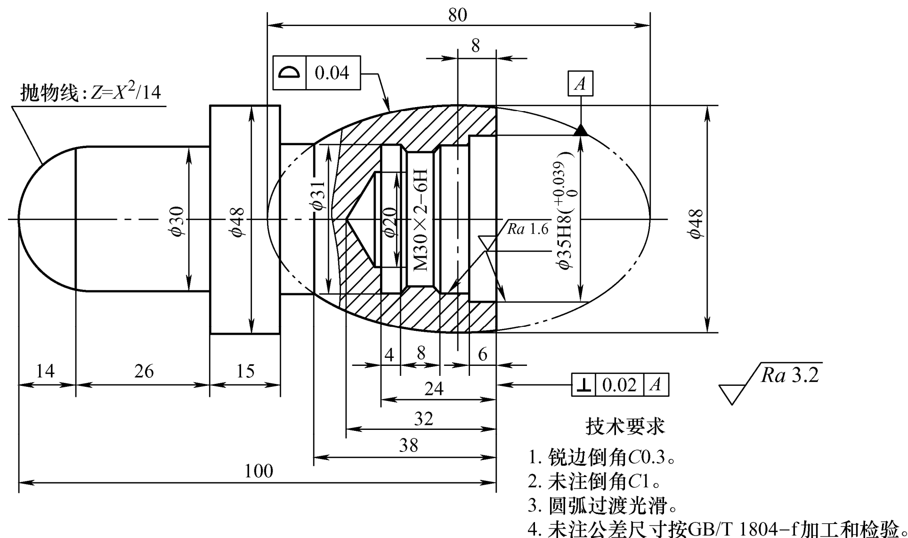


图 1-10　曲线方程式连接轴

1. 工艺分析

加工本例工件时，难点有两个：一是内螺纹的加工，二是由曲线方程构成的回转面（椭圆体、抛物体）的加工，内螺纹的加工主要难在孔径小，刀杆细、刚性差，也不便于观察；曲线方程构成的回转体轮廓的加工难在插补，编程复杂，其次是车刀的副偏角不能太小，否则加工到椭圆结束时会与工件的已加工表面发生干涉。为了方便车内孔，预先钻出相应直径和深度的孔，可手动完成，因此制订出如下加工工艺：

1）夹右端，粗、精车左端外形轮廓ϕ48mm、ϕ30mm 及抛物体。

2）工件调头，用自定心卡盘装夹，夹ϕ30mm 外圆，为避免夹伤，应垫铜皮，注意夹持

长度不能太长，否则将形成过定位，在装夹时应注意精基准面应垫铜皮，以ϕ40mm 外圆为找正基准，打表找正，误差小于 0.02mm。手动车端面，保证工件的总长为 100mm，钻出ϕ20mm 相应直径和深度的孔。

3）粗、精镗孔。

4）用内切槽刀切ϕ31mm×4mm 内孔退刀槽。

5）用内螺纹刀车削 M30×2−6H 内螺纹，LCYC97 螺纹车削循环。

6）计算参数 R 和程序跳转指令车削椭圆曲面。

2. 刀具的选择

本零件加工内容较多，所需刀具的种类也多，主要有 20mm 锥柄麻花钻、93°左偏刀、外切槽刀、60°外螺纹车刀、内孔镗刀、内切槽刀及 60°内螺纹车刀，详见表 1-5。

表 1-5　刀具与切削用量

刀具号	型号	切削用量		
		a_p/mm	f/（mm/r）	n/（r/min）
T01	左偏 93°菱形外圆车刀	2	0.08	150
			0.18	600
T02	外切槽刀（刀宽 4mm）		0.08	400
T03	内孔镗刀		0.05	600
T04	内切槽刀（刀宽 3mm）		0.08	300
T05	60°内螺纹车刀	1	0.12	500
T06	60°外螺纹车刀	1	0.12	500
T07	ϕ20mm 锥柄麻花钻			

3. 相关计算

螺纹总切削深度　　$h=0.6495P=0.6495\times2\text{mm}=1.299\text{mm}$

内螺纹小径　　$d=D-2h=30\text{mm}-2\times1.299\text{mm}=27.402\text{mm}$

4. 参数设定

用椭圆标准方程及直角坐标方式编程。编程时以 Z 值为自变量，每次变化 0.2mm，X 值为应变量，通过变量运算计算出相应的 X 值。

5. 加工程序

（1）左端加工程序

```
ZUODUAN.MPF;                          左端加工程序名
N05 G90 C94;                          绝对编程，分进给
N10 T0101 S800 M03;                   转速 800r/min，换 1 号 93°菱形外圆车刀
N15 G00 X51 Z2;                       快进到左端，外径粗车循环起刀点

N20 CYCLE95("TOUY",   1,   0,   0.2,   , 0.1, 0.1, 0.05,   11,   ,   , 0.5);
   与 CYCLE95(   NPP, MID, FALZ, FZLX, FAL, FF1, FF2, FF3, VARI, DT, DAM, VRT)各项对应
N25 G00 X100 Z50;                     退刀
N30 M05;                              主轴停转
N35 M00;                              程序暂停
```

```
N40 T0101;                                    换 T01 车刀
N45 S1500 M03 F80;                            精车转速 1500r/min，进给速度 80mm/min
N50 G00 X5 Z2;                                快进
N55 R21=0;                                    抛物线 X 坐标初始值
N60 ROOL: R22=−R21*R21/14;                    计算 Z 坐标值
N65 G01 X=2*R21 Z=R22;                        抛物线插补
N70 R21=R21+0.3;                              X 步距 0.25mm
N75 IF R21<=15 GOTOB ROOL;                    满足条件时循环结束
N80 G01 Z−40;                                 车 26mm 端面
N85 X48;                                      加工φ48mm 外圆
N90 Z−62;                                     N50～N90 外径轮廓循环程序
N95G00 X55 M05;                               退刀
N100 X100 Z50;                                退刀
N105 M30;                                     程序结束
```

（2）右端加工主程序

```
YOUDUAN.MPF;                                  右端加工程序名
N05 G90 G94;                                  绝对编程，分进给
N10 T0404 S800 M03;                           主轴转速 800r/min，换 4 号内孔镗刀
N15 G00 X19.5 Z2;                             快进到内孔，粗车循环起刀点
N20 CYCLE95("KK：MM"，1，0，0.2，，0.1，0.1，0.05，11，，，0.5);
N25 G00 Z100;
N30 X50;                                      退刀
N35 M05;                                      主轴停转
N40 M00;                                      程序暂停
N45 S1200 M03 T0404 F80;                      精车转速 1200r/min，进给速度 80mm/min
N50 G00 X39 Z1;                               进刀
N55 KK: G01 X37 Z0;                           走到内径循环起点
N60 X35.02 Z−1;
N65 Z−6;
N70 X31;
N75 Z−12;
N80 X28.5 Z−13;
N85 MM: Z−24;                                 N50～N85 内径轮廓循环程序
N90 X25;                                      X 向退刀
N95 G00 Z100;
N100 X50;                                     退刀
N105 M05;                                     主轴停转
N110 M00;                                     程序暂停
N115 S600 M03 T505 F25;                       换 5 号内切槽刀
N120 G00 X26 Z5;                              快进
N125 Z−23;                                    快进到切槽起点
N130 G01 X31;                                 切槽
N135 X26;                                     退刀
N140 Z−24;                                    进刀
N145 X31;                                     切槽
N150 X26;                                     退刀
N155 G00 Z100;                                返回起点
N160 X50;                                     退刀
```

```
N165 M05;                                  主轴停转
N170 M00;                                  程序暂停
N175 S1000 M03 T0606;                      换 6 号内螺纹车刀
N180 G00 X26;
N185 Z3;                                   快进到内螺纹复合循环起刀点
N190 CYCLE97( 2, , 0, -20, 30, 30, 3, 2, 1.3, 0.05, 30, 0, 6, 1, 3);
    CYCLE97(PIT, MPIT, SPL, FPL, DM1, DM2, APP, ROP, TDEP, FAL, IANC, NSP, NRC, NID, VARI, NUMT)
    中的各项参数对照，必须一一对应，切勿填错
N195 G00 Z100;
N200 X50;                                  退刀
N205 M05;                                  主轴停转
N210 M00;                                  程序暂停
N215 T0101 S800 M03 F150;                  换 1 号 93° 菱形外圆车刀
N220 G00 X51 Z2;                           快进
N225 R25=50;                               设置最大切削余量
N230 STR: TUOY;                            调用椭圆加工子程序
N235 R25=R25-2;                            每次切深双边 2mm
N240 IF R25<=1 GOTOB STR;                  判断毛坯余量是否大于或等于 1
N245 G00 X100 Z50;                         退刀
N250 M05;                                  主轴停转
N255 M30;                                  程序停止
```

（3）右端加工椭圆子程序

```
TUOY.SPF;                                  椭圆加工子程序
N05 R11=40;                                椭圆长半径
N10 R12=24;                                椭圆短半径
N15 R13=8;                                 Z 轴起始尺寸
N20 STR：R14=24*SQRT（R11*R11-R13*R13）/40;
                                           计算 X 轴坐标
N25 G01 X=2*R14 Z=R13-8;                   椭圆插补
N30 R13=R13-0.4;                           Z 轴步距，每次 0.4mm
N35 IF R13>=-30 GOTOB STR;                 判断是否走到 Z 轴终点
N40 G01 Z=-IC(7);                          增量方式加工φ31mm 外圆
N45 X=AC(50);                              绝对方式加工φ48mm 外圆端面并退刀
N50 Z2;                                    退回起点
N55 RET;                                   子程序结束
```

本例的抛物线、椭圆是用标准方程编程的，也可用参数方程编程，这样更加方便，参见 1.5 节例 2。

1.4　内轮廓阶梯轴的编程

相关知识点

根据孔的形状不同，车孔的方法也有差异，主要有车通孔、车不通孔、车内沟槽，如图 1-11 所示。

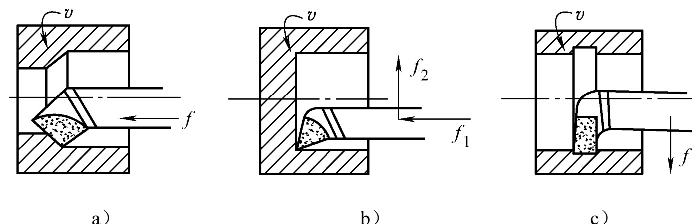


图 1-11　内孔车削

a）车通孔　b）车不通孔　c）车内沟槽

1. 内孔车刀的安装

内孔车刀的安装直接影响到车削情况及孔的精度，所以在安装时一定要注意：

1）刀尖应与工件中心等高或稍高。如果装得低于中心，由于切削抗力的作用，容易使刀柄压低而产生扎刀现象，并可能造成孔径扩大。

2）不柄伸出刀架不宜过长，一般比加工孔长 5～6mm。

3）刀柄基本平行于工件轴线，否则在车削到一定深度时刀柄后半部分容易碰到工件孔口。

4）不通孔车刀装夹时，内偏刀的主切削刃应与孔底平面成 3°～5°角，并且在车平面时要求横向有足够的退刀余地。

2. 工件的安装

车孔时，工件一般采用自定心卡盘安装，对于较大和较重的工件可采用单动卡盘安装。加工直径较大、长度较短的工件（如盘类工件）时，必须找正外圆和端面。一般情况下先找正端面再找正外圆，如此反复几次，直至达到要求为止。

3. 车孔的关键技术

车孔的关键技术是解决内孔车刀的刚性和排屑问题，可采取以下措施：

1）尽量增大刀柄的截面积。

2）尽可能缩短刀柄的伸出长度。

3）排屑问题主要是控制切屑流向。精加工孔时要求切屑流向待加工表面（前排屑），采用正刃倾角的内孔车刀；车不通孔时，应采用负的刃倾角，使切屑从孔口排出。

4）内孔车刀卷屑槽方向的选择：当内孔车刀的主偏角为 45°～75°时，在主切削刃方向磨卷屑槽，能使其切削刃锋利，切削轻快，在切削深度较深的情况下，仍能保持它的切削稳定性，故适用于粗车。如果在副切削刃方向磨卷屑槽，在切削深度较浅的情况下，能达到较好的表面质量。当内孔车刀的主偏角大于 90°时，在主切削刃方向磨卷屑槽，适于纵向切削，但切削深度不能太深，否则切削稳定性不好，刀尖容易损坏。

4. 注意事项

1）起钻时进给量要小，待钻头头部进入工件后才可正常钻削。

2）钻钢件时，应加切削液，以防钻头发热退火。

3）当钻头将要钻穿工件时，钻头横刃首先穿出，轴向阻力大减，这时进给速度必须减慢，否则钻头容易被工件卡死，造成锥柄在尾座套筒内打滑而损坏锥柄和锥孔。

4）钻小孔或钻较深的孔时，由于切屑不易排出，必须经常退出钻头排屑，否则容易因切屑堵塞而使钻头“咬死”，出现折断事故。

5）钻削小孔时，转速应快一些，否则钻削时抗力大，容易产生孔位偏斜和钻头折断。

6）注意进、退刀方向与车外圆相反。

7）孔径应防止喇叭口和出现试刀痕迹。

8）用塞规测量孔径时，应保持孔壁清洁，否则会影响塞规测量。

9）当孔壁温度较高时，不能用塞规立即测量，以防工件冷缩把塞规“咬住”在孔内。

例 1：内轮廓阶梯轴

如图 1-12 所示，工件毛坯件尺寸为ϕ45mm×80mm，材料为 45 钢，编写加工程序。

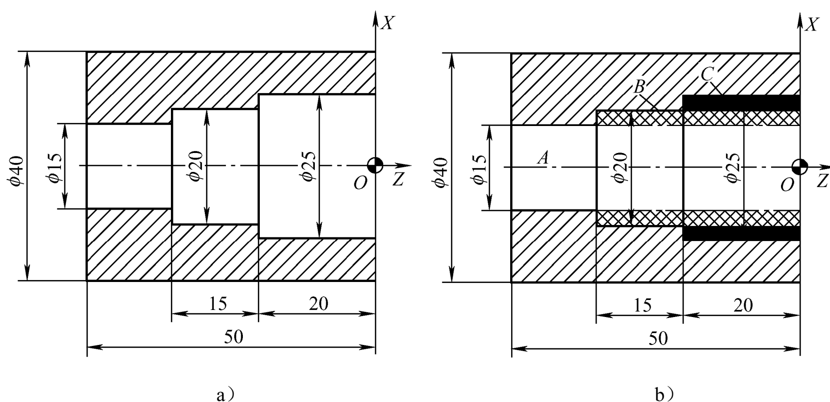


图 1-12　内轮廓阶梯轴

1. 工艺分析

1）用 1 号 45° 弯头车刀车端面及外圆至图 1-12a 所示尺寸。

2）用 2 号ϕ15mm 的麻花钻钻通孔，如图 1-12b 所示的 *A* 区。

3）再用 3、4 号内孔车刀车ϕ20mm、ϕ25mm 内孔，如图 1-12b 所示的 *B* 区、*C* 区。

4）用 5 号切断刀切断。

2. 编制程序

程序如下：

```
LEIKONG.MPF；                  程序号
N05 G95 G90 G40 G71；           程序初始化
N10 G00 X100 Z100；             换刀位置
N15 T01 D01；                   1 号 45° 弯头车刀
N20 M03 S800 F0.15 M08；        主轴正转，转速为 800r/min
N25 X0 Z5；                     刀具移动至加工起始位置
N30 G01 Z0；
N35 X40；                       车端面
N40 Z 55；                      车φ40mm 端面，长度到 55mm
```

```
N45 G00 X50;
N50 G00 X100 Z100;                换刀位置
N55 T2 D2;                        2 号φ15mm 的麻花钻
N60 M03 S800 F0.15 M08;           主轴正转，转速为 800r/min
N65 X0 Z2;                        刀具移动至加工起始位置
N70 G01 Z 50;                     钻φ15mm 的通孔
N75 G00 X0 Z2;
N80 G00 X100 Z100;                换刀位置
N85 T2 D2;                        换 3 号内孔车刀
N90 G00 X0 Z2;                    刀具移动至加工起始位置
N95 G01 X20;
N100 Z35;                         车φ20mm 的台阶孔
N105 G00 X0 Z2;
N110 G00 X100 Z100;               换刀位置
N115 T4 D4;                       换 4 号内孔车刀
N120 G00 X0 Z2;                   刀具移动至加工起始位置
N125 G01 X25;
N130 Z20;                         车φ25mm 的台阶孔
N135 G00 X0 Z2;
N140 G00 X100 Z100;
N145 T5 D5;                       换 5 号切断车刀
N150 G00 X45 Z50;                 刀具移动至加工起始位置
N155 G01 X 0.2 F0.05;             工件掉下，注意工件安全
N160 G01 X50 Z2;
N165 G00 X100 Z100;
N170 M05 M09;                     程序结束部分
N175 M30;
```

点 评

本例车的是台阶（不通）孔，粗车时，也可以采用类似于普通车床上在刀柄上刻线痕作记号或安放限位铜片的通用做法控制车孔深度；精车时，通过对刀，采用程序控制车孔的深度。

相关知识点

衬套是薄壁件的一种，它是对设备进行保护的一类零件，如衬套被安装在阀盖内套住阀杆，以此来防止阀门的泄漏，达到密封的目的；衬套有减小轴承和轴承座之间的磨损，避免轴和孔之间的间隙增大。使用衬套还能方便机械设备的维修、简化设备的结构和制造工艺，材料一般用钢、铸铁、青铜、黄铜、粉末冶金或巴氏合金，相对较软或绵。影响加工精度的因素主要有两方面：

1）由于工件壁薄，由工件、刀具和夹具组成的切削系统刚性较差，装夹工件时，在夹紧力的作用下极易产生变形。切削加工过程中易产生切削振动，在切削力，特别是径向切削力即背向力的作用下，容易产生振动和变形，影响工件的尺寸精度、形状、位置精度和表面粗糙度。

2）由于工件壁薄，切削热会引起工件热变形，使工件尺寸难以控制。特别是对于线膨胀系数较大的金属薄壁零件，如果在一次安装中连续进行粗车、半精车、精车，由于切削热引起的零件热变形，会对尺寸精度产生极大影响，有时甚至会使零件卡死在夹具上。为防止和减小薄壁零件变形，可以采取如下的工艺措施：为减小工件热变形对加工精度的影响，可对工件分阶段加工；为减小工件变形，可增大装夹接触面和采用轴向夹紧夹具，同时还应合理选择刀具几何参数和切削用量。

例 2：衬套的加工

如图 1-13 所示，衬套由内孔、内锥面、圆弧组成，毛坯件的尺寸为ϕ50mm×50mm，材料为青铜，外表面不需加工。

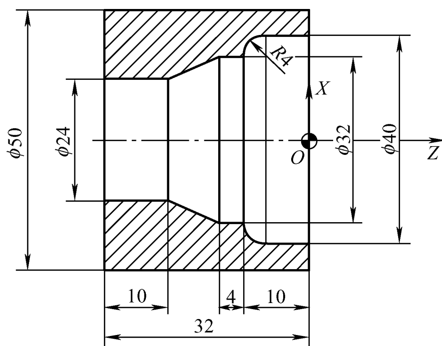


图 1-13　衬套

1. 工艺分析

因最小直径是ϕ24mm，先采用ϕ20mm 的麻花钻手工钻通，再换内孔车刀车削。

2. 编制程序

程序如下：

```
LEIKONG.MPF；                     程序名
N05 G95 G90 G40 G71；             程序初始化
N15 T02 D02；                     内孔车刀
N20 G00 X0 Z2；
N25 G01 X30；                     粗车ϕ32mm 的孔
N30 Z−14；
N35 G01 X22 Z−22；                粗车孔锥，单边留余量 1mm
N40 X0；                          退刀
N45 G00 Z2；
N50 G01 X38；                     粗车ϕ40mm 内孔，单边留余量 1mm
N55 Z−6；
N60 G03 X32 Z−9 CR=3；            粗车 R4mm 圆弧，单边留余量 1mm
N65 G00 X0；                      退刀
N70 Z2；
N75 T03 D03；                     换内孔精加工车刀
N80 G00 X0 Z2；                   精加工内孔
N85 G01 X40；
N90 G01 X40 Z−6；
N95 G03 X32 Z−10 CR=4；
N100 G01 X32 Z−14；
N105 X24 Z−22；
N110 Z−33；
N115 G00 X0；
N120 Z10；
N125 G00 X100 Z100；              程序结束部分
N130 M05 M09；
N135 M30；
```

例 3：液压缸零件加工

ϕ45mm 外圆及长度已加工，只加工内孔及环形槽，如图 1-14 所示。

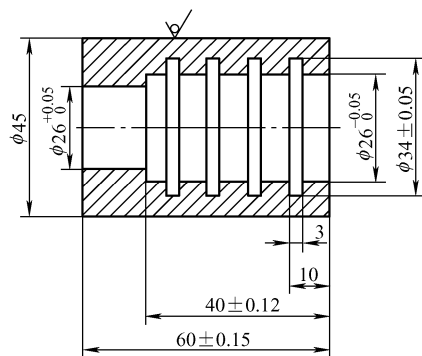


图 1-14　液压缸零件

1. 工艺分析

1）装夹工件，伸出长度为 30mm 左右。

2）看清图样尺寸，选用一把 90°内孔偏刀，伸出长度为 65mm；一把内孔切槽刀，刀宽为 3mm，伸出长度为 45mm。

3）采用试切对刀的方法对刀。

4）车内孔：粗车转速为 265r/min，精车转速为 400r/min，切槽转速为 300r/min。

5）内孔切槽采用 REPEAT 重复编程。

2. 编制程序

程序如下：

HUANCAO.MPF；	内孔环形槽程序
N05 G95 G90 G40 G71；	程序初始化
N10 T01 D01；	换ϕ20mm 的麻花钻
N15 M03 S800 F0.15 M08；	
N20 G00 X100 Z100；	目测刀具位置
N25 X0 Z2；	刀具移动至起点
N30 G01 Z−33 F0.1；	用ϕ18mm 的麻花钻钻通
N35 T02 D02；	换通孔车刀
N40 G00 X0 Z2；	
N45 G01 X20 F0.15；	车ϕ20mm 内孔
N50 Z60.5；	
N55 X18；	退刀
N60 G00 Z100；	
N65 T03 D03；	换 90°内孔偏刀
N70 G00 X26 Z2；	
N75 G01 Z−45 F0.15；	车ϕ26mm 台阶孔
N80 X24；	退刀
N85 G00 Z100；	
N90 T04 D04；	换内孔切槽刀，宽度为 $3_{-0.005}^{0}$ mm
N95 G00 X24 Z0；	准备车环形槽
N100 KK：G91 Z−10；	移到槽的加工位置
N105 G01 X34 F0.1；	切槽
N110 G04 X0.5；	槽底暂停 0.05s
N115 G01 X24；	退刀，准备到下一个槽的加工位置
N120 REPEAT KK P=3；	程序段重复 3 次，加工 4 个槽
N125 G90 G00 Z100 M09；	退刀
N130 X100 Z100；	
N135 M30；	程序结束

3. 容易产生的问题及注意事项

1）内孔车刀的刀尖应尽量与车床主轴的轴线等高。

2）刀杆的粗细应根据孔径的大小来选择，刀杆粗会碰孔壁，刀杆细则刚性差，刀杆应在不碰孔壁的前提下尽量大些为宜。

3）刀杆伸出刀架的距离应尽可能短些，以改善刀杆刚性，减小切削过程中可能产生的振动。

点　评

利用圆弧编程指令加工零件的关键，其一是工件坐标系的设定；其二是在车削内轮廓阶梯轴前钻孔要选择好麻花钻的大小。关于工件坐标的计算，根据零件的难易程度及图样的标注情况，需要具备必要的数学知识。在大多数情况下，编程计算所用的数学知识并不是很深，掌握三角函数与平面几何的知识即可以解决绝大多数零件的坐标计算。

1.5　复杂外轮廓车削编程

相关知识点

非圆曲线的数学处理

节点：逼近直线小段和圆弧小段与轮廓曲线的交点或切点。

数控系统一般只能作直线插补和圆弧插补的切削运动。如果工件轮廓是非圆曲线，数控系统就无法直接实现插补，图 1-15a 所示为用曲线方程表示椭圆，而需要通过一定的数学处理。数学处理的方法是，用直线段或圆弧段去逼近非圆曲线，逼近线段与被加工曲线交点称为节点，图 1-15b 所示为用直线逼近曲线时的情形，下面介绍非圆曲线数学处理的基本过程：

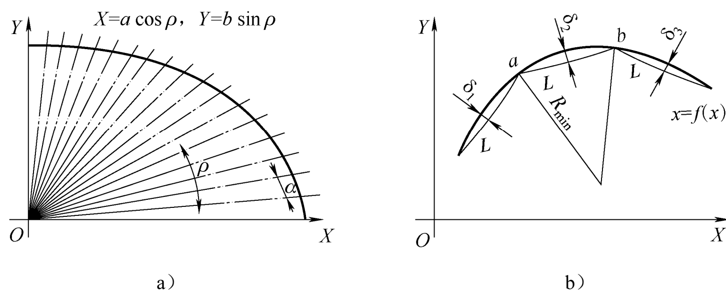


图 1-15　用直线逼近曲线的情形

a）椭圆曲线　b）任意曲线

1）选择插补方式。即应首先决定是采用直线段逼近非圆曲线，还是采用圆弧段或抛物线等二次曲线逼近非圆曲线。

2）确定编程允许误差，即应使 $d \leqslant d_{允}$。

3）选择数学模型，确定计算方法。在决定采取什么算法时，主要应考虑的因素有两条，

其一是尽可能按等误差的条件，确定节点坐标位置，以便最大程度地减少程序段的数目；其二是尽可能寻找一种简便的算法，图 1-15a 所示的椭圆采用等圆心角（α）的方法，简化计算机编程，省时快捷。

4）根据算法，画出计算机处理流程图。

5）用高级语言编写程序，上机调试程序，并获得节点坐标数据。

例 1：椭圆短轴的车削

加工图 1-16 所示零件，材料为硬铝，坯料尺寸为ϕ32mm×84mm。编写加工程序。

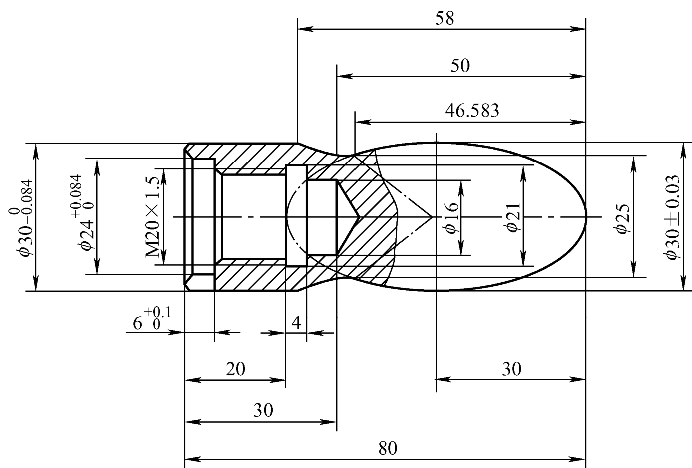


图 1-16　复杂外轮廓车削

1. 工艺分析

工件调头，分两次装夹。

工序 1：夹毛坯，车左侧端面、外圆及内孔各要素，以保证螺纹孔与外圆的同轴度，如图 1-17a 所示。程序号为 ZUODUAN.MPF。

工序 2：调头夹ϕ30mm 已加工外圆（采用软爪或夹铜皮），车右侧椭圆等要素，如图 1-17b 所示。程序号为 YUODUAN.MPF。

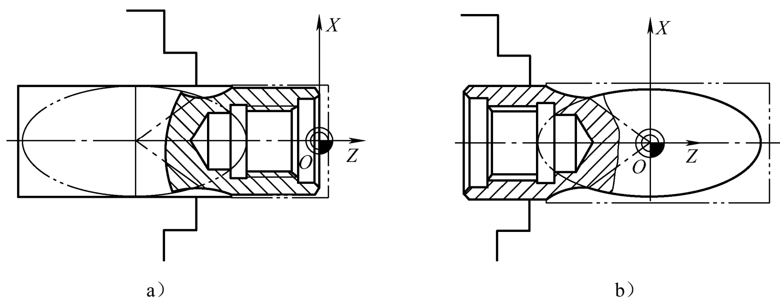


图 1-17　工件安装加工示意图

a）工序 1：车左端　b）工序 2：调头车右端

2. 刀具选择

T1——硬质合金 93°右偏刀。

T2——ϕ16mm 高速钢钻头。

T3——宽 4mm 内孔车刀，D1——左刀具半径补偿值。

T4——高速钢镗刀。

T5——60° 内螺纹车刀。

T6——硬质合金 93° 右偏外圆车刀，副偏角大于 15°。

3. 编制程序

```
ZUODUAN.MPF；                              车左侧端面、外圆及内孔各要素
N05 G56 S800 M3 T1；                       选择刀具，设定工艺数据
N10 G96 S60 LIMS=3000 F0.3；               设定粗车恒线速度
N15 G00 X35 Z0.2；                         快速引刀接近工件，准备粗车端面
N20 G01 X–2；                              粗车端面
N25 G00 X30.5 Z1；                         退刀，准备车外圆
N30 G01 Z–25；                             粗车外圆
N35 X35；
N40 G00 Z1；
N45 G96 S100 LIMS=3000 F0.15；             设定恒线速度准备精车端面与外圆
N50 G00 X–2；
N550 G01 Z0；
N60 X29.96 CHF=1.414；                     倒角
N65 Z–25；
N70 G00 X100 Z150；
N75 G97；                                  取消恒线速度
N80 G17 T2 F0.2 S600；                     换 T2 钻头，钻孔
N85 G00 X0 Z5；
N90 G01 Z–34.6；
N95 G00 Z200；
N100 G18 T3 F0.1 S400；                    换 T3 内孔车刀
N105 G00 X15 Z5；
N110 Z–24；
N115 G01 X21；
N120 G00 X15；
N125 Z200；
N130 T4 F0.1 S500；                        换 T4 镗刀，镗孔
N135 G00 X18.3 Z1；
N140 G01 Z–21；
N145 G00 X16；
N150 Z1；
N155 X21；
N160 G01 Z–5.9；
N165 X18；
N170 G00 Z1；
N175 X23.5；
N180 G01 Z–5.9；
N185 X18；
N190 G00 Z1；
N195 X26；
N200 G01 Z0；
N205 X24.042 Z–1；
N210 Z–6.05；
```

```
N215 X20.3;
N220 X18.3 Z-7;
N225 G00 Z200;
N230 T5 S300;                              换 T5 螺纹车刀，车内螺纹
N235 G00 X12 Z5;
N240 R100=18.3 R101=-6 R102=18.3 R103=-20;   N240～N250 给加工内螺纹赋参数
N245 R104=1.5 R105=2 R106=0.02 R109=2 R110=1;
N250 R111=0.975 R112=0 R113=10 R114=1;
N255 CYCLE97（PIT，MPIT，SPL，FPL，DM1，DM2，APP，ROP，TDEP，FAL，IANC，NSP，
NRC，NID，VARI，NUMT）;
N260 G00 X100 Z150;
N265 M30;

YUODUAN.MPF;                               车右侧椭圆等要素
N05 G57 S600 M03 T01;                      选择刀具，设定工艺数据
N10 G96 S60 LIMS=3000 F0.3;                设定恒线速度
N15 G00 X36 Z30.2;                         快速引刀接近工件，准备车端面
N20 G01 X2;                                车端面
N25 G00 X30.5 Z32;                         退刀，准备粗车外圆
N30 G01 Z28;                               粗车外圆至φ30.5mm
N35 Z40;                                   准备调用循环粗车外轮廓
N40 _CNAME="LK6";                          调用椭圆子程序，循环粗车外轮廓
N45 R105=1 R106=0.2 R108=3 R109=0;         相关参数赋值
N50 R50=3 R111=0.3 R112=0.15;              毛坯循环参数设定
N60 LCYC95;                                调用 LCYC95 循环对外轮廓进行粗加工
N65 G0 X100 Z150;
N70 T06;                                   换 T06 外圆车刀
N75 G00 X32 Z0;
N80 G01 X30.4;
N85 R01=30.2 R02=15.2 R03=91;              加工椭圆左半部分
N90 MA2：R04=R01*COS(R3) R05=R02*SIN(R03);
                                           椭圆左半部分循环加工
N95 G01 Z=R04 X=2*R05;
N100 R03=R03+1;
N105 IF R04>16.583 GOTOB MA2;              Z 坐标为椭圆循环终止条件
N110 G00 Z 20;
N115 X30.5 Z 28;
N120 G00 X40 Z32;
N125 G96 S100 LIMS=3000 F0.15;
N130 G00 X0;
N135 G01 Z30;
N140 R01=30 R02=15 R03=1;                  椭圆右半部分精加工
N145 NA3：R04=R01*COS(R03) R05=R02*SIN(R03);
                                           椭圆右半部分循环加工
N150 G01 Z=R04 X=2*R05;
N155 R03=R03+1;
N160 IF R04> 16.583 GOTOB MA3;             椭圆左半部分循环结束
N165 G01 Z 20;
N170 X30 Z 28;
N175 G00 X100 Z150;
```

```
N180 M30;

LK6.SPF;                                椭圆右半部分粗加工子程序
N10 G01 X0 Z30;
N20 R01=30 R02=15 R03=1 R04=90;
N30 NA1: R05=R01*COS(R03) R06=R02*SIN(R03)
N40 G01 Z=R05 X=2*R06;
N50 R03=R03+1;                          步长为 1
N60 IF R03<R04 GOTOB MA1;               角度为循环终止条件
N70 G01 X30.5;
N80 M17;
```

例 2：内、外椭圆弧复合件的编程

如图 1-18 所示，工件为由内、外椭圆构成的复合件，图中椭圆方程参数 *A*、*B* 分别代表 *Z* 轴、*X* 轴坐标，工件材料为 45 钢，毛坯尺寸为ϕ130mm×65mm，毛坯调质硬度为 200～220HBW，工件倒角为 *C*1mm，编写车削加工程序。

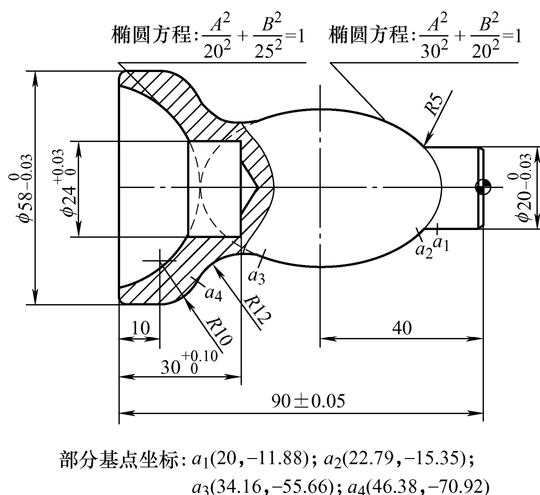


图 1-18　内、外椭圆弧复合件

1．工艺分析

该件形状复杂，刚性较差，粗加工时，夹ϕ58mm 一端，将工件外形初步加工成形，在ϕ20mm 一端留足夹头，调头后，进行半精及精加工内外形状。加工中背吃刀量要小，尽量减小加工中的变形，将内孔ϕ24mm 预先钻到ϕ22mm、深 35mm。

2．编程思路

对于椭圆曲线，编程有两种方案：一种是采用椭圆参数方程用极坐标方式编程，另一种是直接采用椭圆标准方程用直角坐标方式编程。

3．编制程序

（1）用椭圆标准方程、直角坐标方式编程　编程时以 *Z* 值为自变量，每次变化 0.2mm，

X 值为应变量，通过变量运算计算出相应的 X 值。编程时使用以下变量进行运算：

R01（R11）——方程中的 Z 坐标（起点 Z=−15.35mm）。

R02（R12）——方程中的 X 坐标（起点半径值 X=22.79mm）。

R03（R13）——工件坐标系中的 Z 坐标，R03=R01−30。

R04（R14）——工件坐标系中的 X 坐标，R04=R02×2。

加工左端内轮廓程序：

```
BIAOZHUI.MPF；                              主程序名
N05 G90 G95 G40 G71；
N10 T04 D04；                               换内孔车刀
N15 M03 S800 F0.1 M08；
N20 G00 X20 Z2；
N25 CYCLE95("LEITUO1", 1, 0, 0.2, , 0.1, 0.1, 0.05, 11, , , 0.5)；
N30 G74 X0 Z0；
N35 M30；

LEITUO1.SPF；                               子程序名
N05 R11=0；                                 公式中的 Z 坐标值
N10 MK：R12=SQRT(400−R11*R11)*25/20；       公式中的 X 坐标值
N15 R13=R11；                               工件坐标系中的 Z 坐标
N20 R14=R12*2；                             工件坐标系中的 X 坐标
N25 G01 X=R14 Z=R13；                       拟合曲线轮廓
N30 R11=R11−0.2；
N35 IF R11>=−18.2 GOTOB MK；                有条件跳转
N40 G01 X24 Z−18.33；
N45 Z−30；
N50 X20；
N55 RET；
```

加工右端外轮廓程序：

```
YOUDUAN.MPF；                               主程序名
N05 G90 G95 G40 G71；
N10 T01 D01；                               换外圆车刀
N15 M03 S800 F0.1 M08；
N20 G00 X62 Z2；
N25 CYCLE95("YOUDW", 2, 0, 0.3, , 0.2, 0.2, 0.05, 9, , , 0.5)；
N30 G74 X0 Z0；
N35 M30；

YOUDW.SPF；                                 子程序名
N05 G01 X18；
N10 Z0；
N15 X20 Z−1；
N20 Z−11.88；
N25 G02 X22.79 Z−15.35 CR=5；               以下是外椭圆的加工程序
N30 R01=14.6；                              公式中的 Z 坐标值
N35 MK：R02=SQRT(900−R01*R01)*20/30；       公式中的 X 坐标值
N40 R03=R01−30；                            工件坐标系中的 Z 坐标
N45 R04=R02*2；                             工件坐标系中的 X 坐标
```

```
N50 G01 X=R4 Z=R3；                          拟合曲线轮廓
N55 R01=R01−0.2；
N60 IF R01>=−15.6 GOTOB MK；                 有条件跳转
N65 G01 X34.16 Z−55.66；
N70 G02 X46.38 Z−70.96 CR=12；
N75 G03 X58.0 Z−80 CR=10；
N80 G01 X62；
N85 RET
```

（2）用椭圆参数方程、极坐标方式编程　这种方法主程序与前面一样，只需要改变子程序即可，现将加工左端内椭圆（图 1-19）加工子程序 LEITUO1 进行修改如下：

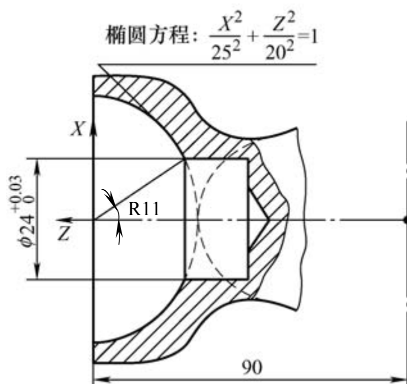


图 1-19　椭圆 R 参数编程

```
LEITUO2.SPF；                                内椭圆子程序
N05 R11=ASIN(12/25)；                        计算椭圆起始角
N10 MK：R21=25*SIN(R11)；                    计算椭圆 X 坐标
N15 R22=20*COS(R11)；                        计算椭圆 Z 坐标
N20 G01 X=2*R21 Z=−R22；                     拟合曲线轮廓
N25 R11=R11+1；                              步距角设为 1°
N30 IF R11<=90 GOTOB MK；                    有条件跳转
N40 G00 Z50；                                退刀
N45 RET；
```

点　评

回转体部分的母线为内外椭圆，不能直接按 G01、G02、G03 指令编程，要经过非圆曲线数学处理之后才能编程，采用直线段逼近内外椭圆（非圆曲线），并设定逼近精度，再利用 IF…GOTOB 有条件循环跳转语句实现循环编程，这是本题的两大关键；其次是在算法上，分别采用了按椭圆标准方程和椭圆参数方程计算各插补点（节点）的坐标，两者各有其特点。

例 3：手柄加工程序

图 1-20 所示手柄的毛坯件尺寸为 ϕ60mm×200mm，材料为 45 钢，试进行分析并应用 R 参数编写加工程序。

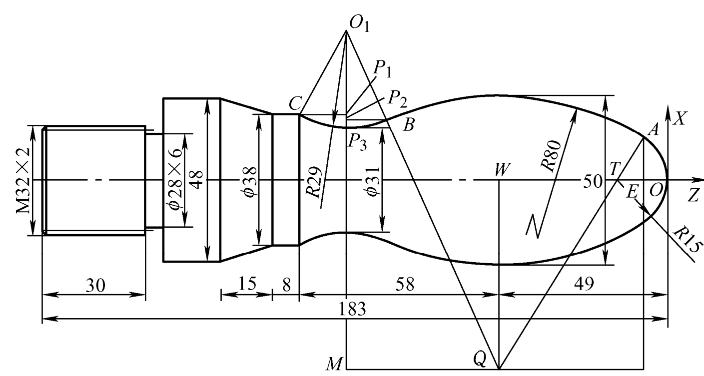


图 1-20　手柄

1. 工艺分析

根据要求及毛坯情况，按先主后次的原则，确定工艺方案和加工路线如下：

1）以工件右端面中心为坐标系原点，设定工件坐标系。根据零件尺寸精度及技术要求，本例将粗、精加工分开来考虑，确定的加工工艺路线为：

装夹棒料毛坯一端，车削右端面，粗车手柄外形，精车手柄外形，螺纹大径按ϕ44mm 车削并与ϕ48mm 形成台阶，该台阶作为工件调头后长度方向的测量基准控制工件总长。

工件调头，手柄外形伸入机床主轴孔内，卡ϕ48mm 外圆，垫铜皮，夹紧工件，按ϕ44mm 车削与ϕ48mm 形成的台阶面控制 M32×2 螺纹的退刀槽及螺纹长度，达到控制工件总长的目的，车退刀槽、循环车削 M32×2 螺纹、切断，最后完成加工。

2）夹具采用数控车床本身的标准卡盘，棒料伸出卡盘外 105mm 左右，找正后夹紧。

3）刀具的选择：1 号刀具为 90° 硬质合金机夹车刀，用于粗车加工；2 号刀具为 90° 硬质合金机夹车刀（使用可转位刀片），用于精车加工；3 号刀具为硬质合金机夹切断刀，其刀片宽度为 4mm，用于切槽、切断等车削加工；4 号刀具为 60° 硬质合金机夹螺纹车刀，用于螺纹车削加工。

4）切削用量的选择。选用切削用量时主要考虑加工精度要求，兼顾提高刀具寿命、机床寿命等因素。切削用量见表 1-6。

表 1-6　手柄外形加工的切削用量

工　　艺	主轴转速 n/（r/min）	进给量 f/（mm/r）
粗车外圆	720	0.2
精车外圆	1090	0.08
切槽	470	0.08
车螺纹	600	2

2. 计算坐标点

计算 A、B 两点坐标：

设 R01=（80−25）/（80−15），R02=SQRT（1−R01×R01），则 A 点：X=2×15×R01，Z=−15×R02。

设 R03=SQRT{29×29−[29−（19−15.5）]}−{[29−（19−15.5）]}，R04=58−R03，R05=R04/（29+80），R06=SQRT（1−R05×R05），则 B 点：X=2（15.5+29−29×R06），Z=−（49+R04−29×R05）。

3. 手柄外形加工程序

程序如下：

SHUOBING1.MPF；

```
N05 G54 G90 G00 G22 X100 Z100;                到换刀点
N10 T01 D01;                                  车端面
N15 X60 Z0;
N20 M03 S600 F0.15;
N25 G01 X−0.2;
N30 G00 X100 Z100;                            到换刀点
N35 T02 D02;                                  粗、精车外形
N40 M03 S600;
N45 G00G42 X0 Z10;
N50 G01 X0 Y0 F0.15;
N55 R01=(80−25)/(80−15), R02=SQRT(1−R01*R01);
N60 G03 X=2*15*R01 Z=−15*R02 CR=15;     乘号只能用“*”而不能用“×”或“·”
N65 X=2*(15.5+29−29*R06) Z=− (49+R04−29*R05) CR=80;
N70 G02 X38 Z=− (58+49) CR=29;
N75 G01 Z=−IC(8);                             IC 为增量坐标
N80 X=48 Z=−IC(15);
N85 Z−183;
N90 G00 X100 Z100;                            到换刀点
N95 M30;
```

工件调头，外垫铜皮，夹ϕ48mm 外圆，另设坐标零点。

```
SHUOBING2.MPF;
N05 G54 G90 G00 G22 X100 Z100;                到换刀点
N10 T01 D01;                                  车端面，控制工件总长
N15 M03 S600;
N20 X60 Z0;
N25 G01 X−0.2 F0.15;
N30 G00 X100 Z100;                            到换刀点
N35 T03 D03;                                  粗、精车 M32 外圆
N40 X32 Z20;
N45 M03 S600 F0.15;
N50 G01 Z−36;
N55 X80;
N60 G00 X100 Z100;                            到换刀点
N65 T04 D04;                                  换切槽刀
N70 M03 S600 F0.15;
N75 G00 X50 Z−30;
N80 G01 X−28;
N85 X80;
N90 G00 Z100;
N95 M30;
```

4. 手柄螺纹加工程序

加工 M32×2 右旋螺纹，螺距为 2mm。圆柱表面已经加工完成。牙型高度=0.6495P=0.6495×2mm=1.299mm（半径表示），牙型高度=（0.9+0.6+0.6+0.5）mm=2.6mm（直径表示），螺纹长度为 30mm（包括导入空刀量 7mm 和退出空刀量 3mm，共计 40mm）。

程序如下：

```
SHUOLUO1.MPF;                                 手柄螺纹加工程序
N05 G54 G90 G00 G22 X100 Z100;                到换刀点
```

```
N10 T05 D05;                       选用螺纹车刀
N15 G00 X−50 Z5 M03 S600;
N20 G00 X50 Z7;                    第一次循环加工开始的位置
N25 X31.1;                         第一次切削螺纹深度至 31.1mm=（32−0.9）mm
N30 G33 Z−33 K2;                   开始第一次切削螺纹
N35 G00 X50;                       直径退刀 X=50mm
N40 Z7;                            Z 向退刀到开始加工的位置
N45 X30.5;                         第二次切削螺纹深度至 30.5mm=（31.1−0.6）mm
N50 G33 Z−53 K2;                   开始第二次切削螺纹
N55 G00 X50;                       直径退刀 X=50mm
N60 Z7;                            直径退刀 X=50mm
N65 X29.9;                         第三次切削螺纹深度至 29.9mm=（30.5−0.6）mm
N70 G33 Z−53 K2;
N75 G00 X50;
N80 Z7;
N85 X29.4;                         第四次切削螺纹深度至 29.4mm=（29.9−0.5）mm
N90 G33 Z−53 K2;
N95 G00 X50;
N100 Z7;
N120 G00 X100 Z50;
N125 M30;
```

还可用 REPEAT 循环指令编写，以简化编程，程序如下：

```
SHUOLUO2.MPF;                      手柄螺纹加工程序
N05 G54 G90 G00 G22 X100 Z100;     到换刀点
N10 T05 D05;                       选用螺纹车刀
N15 G00 X−50 Z5 M03 S600;
N20 G00 X50 Z7;                    开始加工的位置
N23 R10=32−0.6495*2/4;             分 4 刀加工螺纹
N25 KK: X=R10;                     第一次切削螺纹深度
N30 G33 Z−33 K2;                   开始第一次切削螺纹
N35 G00 X50;                       直径退刀 X=50mm
N40 Z7;                            Z 向退刀到开始加工的位置
N45 R10=R10−0.6495*2/4;            REPEAT 为重复循环指令
N50 REPEAT KK P=3;                 N25～N45 程序段重复三次
N55 G00 X100 Z50;
N60 M30;
```

1.6　带补偿功能的车削编程

相关知识点

车削刀具半径补偿

在编程过程中，为了避免复杂的数值计算，一般按零件的实际轮廓来编程。但刀具具有一定的刀尖圆弧半径，若不考虑该尺寸，加工出来的实际轮廓就会与图样所要求的轮廓差一个刀尖圆弧半径的值。因此，采用刀具半径补偿功能来解决这一问题。刀具半径补偿参数包括刀具半径补偿值和假想刀尖方位（0～9），可以在补偿运行过程中变换刀具补偿号 D。刀具补偿号变换后，

在新刀具补偿号程序段的起始处，新刀具半径就已经生效，但整个变化需等到程序段结束才能发生。这些修改值由整个程序段连续执行，无论是直线还是圆弧插补都一样。操作时，可以将每一把刀具的四个数据分别设定到刀具补偿号对应的存储单元中，即可实现自动补偿。如图 1-21a 所示，A 是一假想刀尖，未采用刀具半径补偿指令时，刀具以假想刀尖轨迹运动，圆锥面产生误差δ。如图 1-21b 所示，采用刀具半径补偿指令后，系统自动计算刀心轨迹，使刀具按刀尖圆弧中心轨迹运动，无表面形状误差。A_0～A_1 为产生刀具补偿过程，A_1～A_4 为取消刀具补偿过程，相对于图 1-21a 而言，图 1-21b 中的刀具多走了一个补偿值。

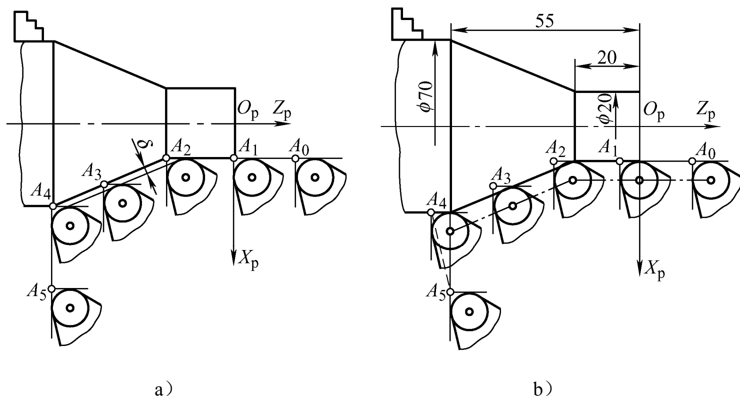


图 1-21　车削刀具半径补偿

a）无刀具半径补偿 b）刀具半径左补偿

程序片段：

```
…
N15 M06 T01;                          换刀 T01
N20 G96 S120 LIMS=3000 F0.15;         恒线速度设定
N040 G00 X20.0 X2.0;                  进至 A 点
N050 G41 G01 X20.0 Z0;                刀具半径左补偿 A0～A1
N060 Z20.0;                           车φ120mm 外圆 A1～A4
N070 X70.0 Z–55;                      车锥面 A2～A3
N080 G40 G00 X80.0 Z–55;              退刀，取消补偿 A4～A5
…
```

例：应用刀具半径补偿功能编写传动轴零件的加工程序

传动轴零件如图 1-22 所示，材料为 45 钢，毛坯尺寸为ϕ120mm×140mm，毛坯调质硬度为 205～250HBW，应用刀具半径补偿功能编写传动轴零件轮廓精加工程序。

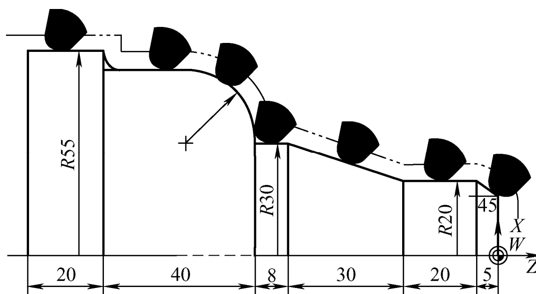


图 1-22　应用刀具半径补偿加工传动轴零件

程序如下：

DAOBU1.MPF；	
N05 G54 G90 G00 G95 X110 Z200；	加工状态初始化
N10 M06 T01；	换刀 T01
N15 G96 S120 LIMS=3000 F0.15；	恒线速度设定
N20 G00 X0 Z5；	快进至接近工件
N25 G01 G42 D02 Z0；	切入并建立刀具半径补偿
N30 X20 CHF=5*1.414；	倒角
N35 Z−25；	
N40 X30 Z−55；	
N45 Z−63；	
N50 G03 X50 Z−83 CR=20；	
N55 G01 Z−103；	
N60 X55；	
N65 Z−130；	
N70 G00 G40 X100 Z150；	G40 取消刀具半径补偿
N75 M30；	结束程序

1.7 恒螺距螺纹切削

相关知识点

1. G33 恒螺距螺纹切削

使用 SINUMERIK 802S 系统的 G33 功能的前提是：数控机床的主轴上必须配备有位移测量系统。用 G33 功能可以加工出各种恒螺距螺纹，如圆柱螺纹，圆锥螺纹，外、内螺纹，单线螺纹和多线螺纹等。

程序格式：

G33 Z__ I__ SF=__ ；	车削圆柱螺纹
G33 Z__ X__ I__ ；	车削圆锥螺纹，*X* 轴尺寸变化较大

其中：

X、Z：——螺纹终点的坐标。

I：——螺距。

SF：——加工多线螺纹的起始点偏移量。

注释：在具有两个坐标轴尺寸的圆锥螺纹加工中，螺距地址 I 下必须设置较大位移方向（较大螺纹长度）的螺纹尺寸，另一个较小的螺距尺寸不用给出。

2. CYCLE97 螺纹切削循环指令[SINUMERIK 802D 与 802S（C）对照]

螺纹切削循环是一个很实用的循环编程指令，它可以按纵向或横向加工圆柱螺纹、圆锥螺纹、外螺纹或内螺纹。它既能加工单线螺纹，又能加工多线螺纹。在切削过程中，其每一刀的背吃刀量可由系统自动设定。程序格式：

CYCLE97（PIT，MPIT，SPL，FPL，DM1，DM2，APP，ROP，TDEP，FAL，IANC，NSP，NRC，NID，VARI，NUMT）；

相关参数说明见表 1-7。

表 1-7　CYCLE97 螺纹切削循环指令[SINUMERIK 802D 与 802S（C）对照]表

802D		802S（C）
导程（无符号输入）	PIT	R104
用螺纹公称直径来表示螺距（如 M10 的螺距为 1.5mm）	MPIT	R100
螺纹起始点的纵坐标	SPL	R101
螺纹终点的纵坐标	FPL	R103
起始点的螺纹直径	DM1	R100
终点的螺纹直径	DM2	R102
空刀导入量（无符号输入）	APP	R109
空刀退出量（无符号输入）	ROP	R110
螺纹深度（无符号输入）	TDEP	R111
精加工余量（半径值，无符号输入）	FAL	R106
切入进给角，“+”为沿侧面的进给，“-”为交错进给	IANC	—
首牙螺纹的起始点偏移（无符号输入）	NSP	R112
粗加工切削次数（无符号输入）	NRC	R113
停顿时间（无符号输入）	NID	—
螺纹的加工类型，范围值：1～4	VARI	R105
螺纹线数（无符号输入）	NUMT	R114

例 1：简单直螺纹的加工

如图 1-23 所示，车削 M30×2 的螺纹，编写加工程序。

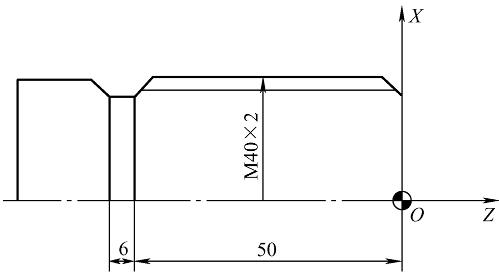


图 1-23　简单直螺纹的加工

1. 工艺分析

1）螺纹长度中要考虑足够的导入量和退出量。

2）在螺纹加工期间，进给修调开关无效。

3）螺纹加工中进给次数和进给量见表 1-8。

表 1-8 螺纹加工中进给次数和进给量 （单位：mm）

牙型高度=0.6495*P*（*P* 为螺距）								
螺 距		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
牙 深		0.649	0.974	1.299	1.624	1.949	2.273	2.598
背吃刀量及切削次数	1 次	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	1.5
	2 次	0.4	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8
	3 次	0.2	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	4 次		0.16	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6
	5 次			0.1	0.4	0.4	0.4	0.4
	6 次				0.15	0.4	0.4	0.4
	7 次					0.2	0.2	0.4
	8 次						0.15	0.3
	9 次							0.2

2. 编制程序

程序如下：

```
DANTOULW.MPF;                简单直螺纹加工程序名
N05 G54 G90 S500 M03;        程序初始化
N10 G00 X100 Z50;
N15 T01 D01;                 选用螺纹车刀
N20 G00 X50 Z7;              开始加工的位置，第一次循环
N25 X39.1;                   第一次切削螺纹深度 39.1mm=（40−0.9）mm
N30 G33 Z−53 K2;             开始第一次切削螺纹
N35 G00 X50;                 直径退刀 X=50mm
N40 Z7;                      Z 向退刀到开始加工的位置，准备第二次循环
N45 X38.5;                   第二次切削螺纹深度 38.5mm=（39.1−0.6）mm
N50 G33 Z−53 K2;             开始第二次切削螺纹
N55 G00 X50;                 直径退刀 X=50mm
N60 Z7;
N65 X37.9;                   第三次循环
N70 G33 Z−53 K2;
N75 G00 X50;
N80 Z7;
N85 X37.5;                   第四次循环
N90 G33 Z−53 K2;
N95 G00 X50;
N100 Z7;
N105 X37.4;                  第五次循环
N110 G33 Z−53 K2;
N115 G00 X50;                加工结束
N120 G00 X100 Z50;
N125 M30;
```

相关知识点

数控车床加工多线螺纹与普通车床加工原理基本相同，其加工方法通常有通过改变螺纹

切削起始角度和通过改变螺纹轴向切削起点两种。

例 2：双线直螺纹的加工

如图 1-24 所示，车削双线螺纹 M24×3（螺距 P=1.5mm），编写加工程序。

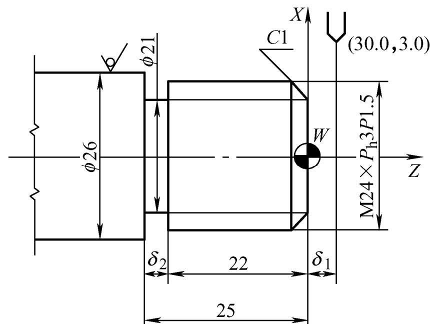


图 1-24　双线直螺纹的加工

1. 工艺分析

加工多线螺纹的关键在于起始点偏移量的设置，除第一线螺纹外，后续螺纹的起始点偏移量是以第一线螺纹的位置为基准进行设置的。本例为双线螺纹，第二线螺纹的起始点偏移量为 180°，通过 SF 设定，多线螺纹的加工如图 1-25 所示。

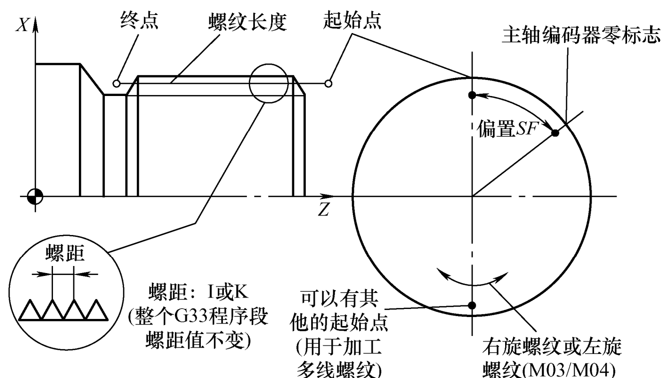


图 1-25　多线螺纹的加工

2. 相关计算

1）空刀导入量δ_1，取 2～3 个螺距，现取 2 个螺距 3mm；空刀导出量δ_2，大于 1～2 个螺距，现取 2mm。

2）计算螺纹小径：d_1=d−2×0.62P=（24−2×0.62×1.5）mm=22.14mm。

3）确定背吃刀量分布：1mm、0.5mm、0.36mm。

3. 编制程序

程序如下：

```
SHUANTOULW.MPF;                    双线直螺纹的加工
N05 G54 G90 S500 M03;              程序初始化
N10 G00 X100 Z50;
N15 T01 D01;                       选用螺纹车刀
N20 S300 M03;                      主轴正转，转速为300r/min
```

```
N25 G00 X23 Z3；                      快速进刀至螺纹起点
N30 G33 Z−24 K3 SF=0；                切削第一线螺纹，背吃刀量为 1mm
N35 G00 X30；                         X 向快速退刀
N40 G00 Z3；                          Z 向快速返回螺纹起点处
N45 G00 X22.5；                       X 向快速进刀至螺纹起点处
N50 G33 Z−24 K3 SF=0；                切削第一线螺纹，背吃刀量为 0.5mm
N55 G00 X30；                         X 向快速退刀
N60 G00 Z3；                          Z 向快速返回螺纹起点处
N65 G00 X22.14；                      X 向快速进刀至螺纹起点处
N70 G33 Z−24 K3 SF=O；                切削第一线螺纹，背吃刀量为 0.36mm
N75 G00 X30；                         X 向快速退刀
N80 G00 Z3；                          Z 向快速返回螺纹起点处
N85 G00 X23；                         X 向快速进刀至螺纹起点处
N90 G33 Z−24 K3 SF=180；              切削第二线螺纹，背吃刀量为 1mm
N95 G00 X30；                         X 向快速退刀
N100 G00 Z3；                         Z 向快速返回螺纹起点处
N105 G00 X22.5；                      X 向快速进刀至螺纹起点处
N110 G33 Z−24 K3 SF=180；             切削第二线螺纹，背吃刀量为 0.5mm
N115 G00 X30；                        X 向快速退刀
N120 G00 Z3；                         Z 向快速返回螺纹起点处
N125 G00 X22.14；                     X 向快速进刀至螺纹起点处
N130 G33 Z−24 K3 SF=180；             切削第二线螺纹，背吃刀量为 0.36mm
N135 G00 X100；                       退回换刀点
N140 G00 Z100；
N125 M30；                            加工结束
```

点　评

多线螺纹由于其导程角较大，牙型深，切削层面积大，所以加工时常会出现“扎刀”现象；又因为操作者个人的技术水平问题，会使其在加工中出现“分线”不匀的现象。应从两方面入手解决：正确刃磨车刀和操作时采用正确的分线方法。

例 3：内、外螺纹的复合零件加工

内、外螺纹零件加工如图 1-26 所示，材料为 45 钢，除内、外螺纹外，其余已加工好，其中内螺纹是梯形螺纹，试编写内、外螺纹车削加工程序。

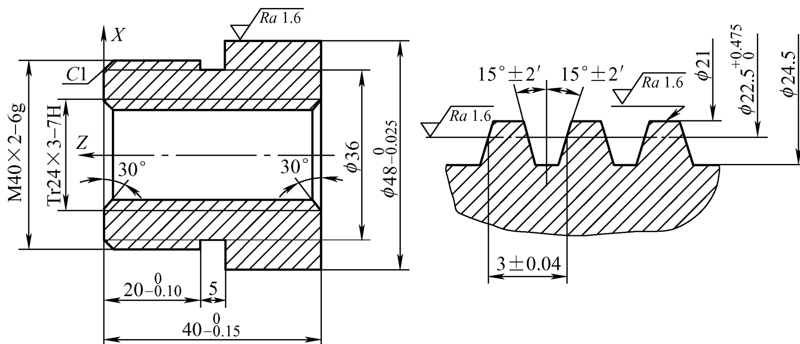


图 1-26　内、外螺纹零件加工

1．工艺分析

此例只编写加工内、外螺纹的程序。工件装夹方式：夹右端ϕ48mm 外圆，外垫铜皮，按已加工的外圆及端面打表（百分表）找正，定位误差控制在 0.003mm。

2．编制程序

程序如下：

```
NEILUOWEN.MPF；                                内螺纹加工程序
N10 G90 G95 G40 G71；
N15 T03 D01；                                  换外螺纹车刀
N10 M03 S600 F0.1 M08；
N15 G00 X42 Z3；
N20 CYCLE97(  2,    ,   0, –20,  40,  40,  3,  2,  1.3, 0.05,  30,  0,  6,  1,   3)；
  与 CYCLE97(PIT, MPIT, SPL, FPL, DM1, DM2, APP, ROP, TDEP, FAL, IANC, NSP, NRC, NID, VARI, NUMT)
  各项对应
N25 G74 X0 Z0；                                返回参考点
N30 T02 D02；                                  换内梯形螺纹车刀
N35 M03 S400 F0.1 M08；
N40 G00 X25.0 Z6.0；
N45 CYCLE97(3, 0, –45, 21, 21, 6, 3, 1.75, 0.05, 15, 0, 20, 1, 4)；
N50 G74 X0 Z0；
N55 M30；
```

例 4：外螺纹联接轴的车削加工

图 1-27 所示为外螺纹联接轴，毛坯为锻件，材质为 42CrMo，毛坯尺寸为ϕ65mm×110mm，试编写其加工程序。

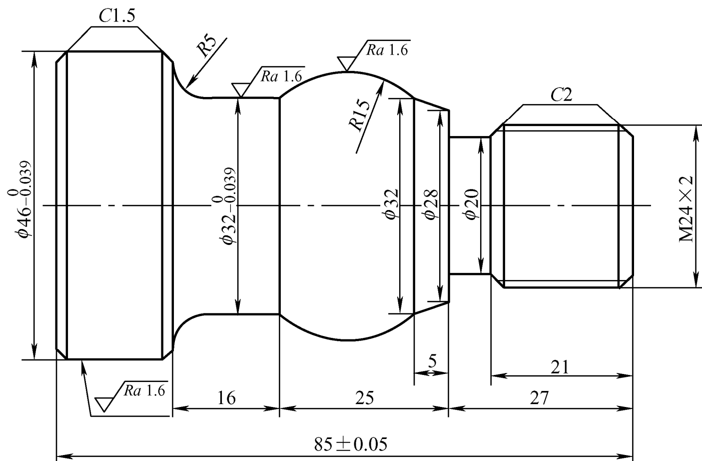


图 1-27　外螺纹联接轴

1．工艺分析

由于工件段小，毛坯较长，夹头足够，加工时，先采用手动方式车削左端外轮廓及端面，保证ϕ46mm 外圆尺寸，调头后采用一夹一顶的方式装夹，找正工件后加工右端外轮廓，最后切断，保证工件总长即可。

2. 编制程序

程序如下：

```
WAILEIWEN.MPF；                                外螺纹联接轴加工主程序
N05 G90 G95 G00；
N10 T01 D01；                                  换外圆车刀
N15 M03 S800 F0.1 M08；
N20 G00 X50.0 Z2.0；
N25 CYCLE95("L429", 2.0, 0, 0.3, , 0.2, 0.2, 0.05, 9, , , 0.5)；
N30 G00 X100.0 Z100.0；
N35 T02 D02 S600；                             换外切槽刀，刀宽为 3mm
N40 G00 X26.0 Z–24.0；
N45 CYCLE93(24.0, –19.0,    6.0,    2.0,    0,    45.0,    0,    0,    0,    0,0,0.2,0.3,3.0,1.0,5)；
  与 CYCLE93(SPD,  SPL, WIDG, DIAG, STA1, ANG1, ANG2, RCO1, RCO2, RCI1, RCI2, FAL1, FAL2,
  IDEP, DTB, VRTI）各项对照
N50 G00 X100.0 Z100.0；
N55 T03 D03；                                  换外螺纹车刀
N60 G00 X26.0 Z3.0；
N65 CYCLE97(2.0,,0, –21.0,24.0,24.0,3.0,3.0,1.3,0.05,30.0, ,6,1.0,3,1)；
N75 G74 X0 Z0；
N80 M30；

L429.SPF；                                     加工右端外轮廓子程序
N10 G01 X19.8；                                螺纹外圆车小 0.2mm
N15 Z0；
N20 X23.8 Z–2.0；
N25 Z–27.0；
N30 X28.0；
N35 X32.0 Z–32.0；
N40 G03 X32.0 Z–52.0 CR=15.0；
N45 G01 Z–63.0；
N50 G02 X42.0 Z–68.0 CR=5.0；
N55 G01 X43.0；
N60 X46.0 Z–69.5；
N65 X50.0；
N70 RET；
```

常用螺纹加工指令的应用辨析

1. 中小螺距的加工

（1）G32 直进式切削方法　中小螺距的加工采用直进式切削方法，由于两侧切削刃同时工作，切削力较大，排屑困难。因此在切削时，两切削刃容易磨损，在切削较大螺距的螺纹时，由于切削深度较大，切削刃磨损较快，从而降低螺纹中径的加工精度。但是由于在一次加工中完成牙型，只要刀具本身有较好的牙型精度，则其加工的牙型精度也较高。由于其刀具移动切削均靠编程来完成，所以加工程序较长；由于切削刃容易磨损，因此加工中要做到勤测量，一般多用于小螺距螺纹加工。

（2）G92 直进式切削方法　G92 和 G32 一样，也采用了直进式切削方法，但程序中已经包含了进刀和退刀过程，简化了编程。G92 指令较 G32 指令提高了效率，适用于中小螺距的加工。

2. 大螺距螺纹加工

大螺距螺纹的加工采用斜进式切削方法，如 G76。由于为单侧刃加工，切削刃 单边磨损，牙型两侧质量不一致，使加工的螺纹面不直，刀尖角容易发生变化，从而影响牙型精度。但由于是单侧刃工作，刀具负载较小，排屑容易，并且切削深度为开平方式递减，每刀切削层截面积恒定，保证了刀具受力维持在设定的水平。

此加工方法排屑容易，切削刃加工工况较好，在螺纹精度要求不高的情况下，此加工方法更为方便快捷。另外，编程简洁方便，在同一程序中可以根据需要设定最后的精车背吃刀量。此加工方法一般适用于大、中螺距螺纹的加工。

3. 高精度螺纹加工

在加工较高精度螺纹时，可用两把刀加工完成，即先用加工效率高而编程简洁的 G76 进行粗车，然后用 G32 或 G92 进行精车，但要精确对刀，保证刀具起始点位置准确，不然容易乱扣，造成零件报废。

4. 螺纹的修正

（1）螺纹牙型的修正　螺纹加工完成后可以通过观察螺纹牙型判断螺纹质量，并及时采取措施。当螺纹牙顶未被削尖时，由于常用的螺纹材料皆为塑性材料，增加刀的切入量反而会使螺纹大径增大，增大量视材料塑性而定。塑性越好，增大越明显。当牙顶已被削尖时，增加刀的切入量，则大径成比例减小。根据这一特点，要正确对待螺纹的切入量，防止报废。对一般紧固螺纹，大径超差时可以用平刀修光。

（2）螺纹中径的修正　在粗加工完成后要及时测量，适当调整刀补。对传动螺纹，螺纹中径一旦加工小了就会造成零件报废，故要非常小心。中径不到尺寸时，可以在 *Z* 向加刀补，但不宜一次加到位，分两次来做比较稳妥。

5. 切削参数

螺纹加工中的进给次数和背吃刀量会直接影响螺纹的加工质量。粗车和精车要用不同的背吃刀量，主轴应选择较低的转速。车削螺纹时的进给次数和背吃刀量可参考有关资料。对于螺纹大径，应根据螺纹尺寸标注和公差要求进行计算，并由外圆车削来保证。

6. 指令选用

螺纹加工在不同系统中指令格式略有差异，但原理是相同的。加工小螺距螺纹时宜用 G32 或 G92，加工轴向小直径内螺纹时可以用 G33，加工大螺距螺纹时宜用 G76，加工变螺距螺纹用 G34，加工高精度小螺距螺纹时宜用 G32、G92，加工高精度、大螺距螺纹时可采用 G92、G76 混合编程，可先用 G76 粗加工，再用 G92 精加工。在实际编程和加工中要根据螺纹精度、尺寸、材质等因素合理选择，灵活使用以上四种指令。在保证技术要求的前提下，努力简化程序，提高编程和加工效率。

1.8　恒切削速度编程

例：转子轴的车削加工

零件图如图 1-28 所示，材料为 40Cr，毛坯尺寸为 ϕ150mm×65mm，编写车削加工程序。

1．工艺分析

1）装夹毛坯件，采用一次装夹，伸出长度为 130mm 左右，加工完后切断即可。
2）刀具：T1 为硬质合金 93°偏刀，T2 为宽 3mm 的硬质合金切断刀。
3）采用试切对刀的方法对刀。
4）分别采用子程序切槽和跳转循环指令切槽编程。
5）程序检查：空运行检查参数，翻页检查尺寸，仿真检查图形。
6）起动切削加工。
7）加工完毕，检查、修改后交验。

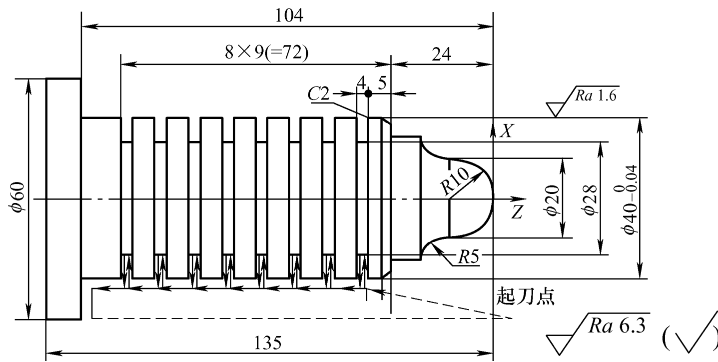


图 1-28　转子轴的车削加工

2．编制程序

程序如下：

ZHUANZI1.MPF；	采用子程序切槽
N05 G00 G54 S300 M03 M07 T1；	选择刀具，设定工艺数据
N10 G00 G96 S50 LIMS=3000 F0.3；	设定粗车恒线速度
N15 G00 X65 Z0 M08；	快速引刀接近工件，准备车端面
N20 G01 X−1；	车端面，刀具过工件中心
N25 G00 X65 Z10；	退刀
N30 CNAME="LK2"；	调用轮廓加工子程序
N35 R105=1 R106=0.2 R108=4 R109=0；	给定毛坯循环参数
N40 R110=2 R111=0.3 R112=0.15；	给定毛坯循环参数
N45 LCYC95；	调用 LCYC95 循环粗加工轮廓
N50 G00 G96 S80 LIMS=3000 F0.15；	设定精车恒线速度
N55 R105=5；	调整循环参数
N60 LCYC95；	调用 LCYC95 循环精加工轮廓
N65 G00 X100 Z150；	快速退刀
N70 G00 G97；	取消恒线速度
N75 T02 F0.1 S250；	换切槽刀，调整工艺数据
N80 G00 X42 Z−33；	快速引刀至槽 Z 向左侧
N85 LCEXP2 P8；	调用子程序 8 次加工 8 个槽
N90 G00 X100 Z150 M09；	快速退刀，关切削液
N95 M30；	程序结束

LK2.SPF；	轮廓加工子程序
N05 G01 X0 Z0；	

```
N10 G03 X20 Z−10 CR=10；            加工 R10mm 圆弧
N15 G01 Z−20；
N20 G02 X30 Z−25 CR=5；             加工 R10mm 圆弧
N25 G01 X39.98 CHF=2.818；          倒角，C2mm
N30 Z−100；
N35 X60 Z−105；
N40 M17；                           子程序结束

LCEXP2.SPF；                        切槽子程序
N05 G91 G01 X−14 Z0；
N10 G04 X1；                        槽底暂停 1s，便于断屑
N15 G01 X14；                       退刀
N20 G00 Z−8；                       到下一个槽的加工位置
N25 G00 G90
N30 M17

ZHUANZI2.MPF；                      跳转循环指令切槽
N05 G55 S300 M03 M07 T01；          选择刀具，设定工艺数据
N10 G00 96 S50 LIMS=3000 F0.3；     设定粗车恒线速度
N15 G00 X65 Z0 M08；                快速引刀接近工件，准备车端面
N20 N40 G01 X−1；                   车端面，刀具过工件中心
N25 G00 X65 Z10；                   退刀
N30 CNAME="LK2"；                   调用轮廓加工子程序
N35 R105=1 R106=0.2 R108=4 R109=0； 毛坯循环参数设定
N40 R110=2 R111=0.3 R112=0.15；
N45 LCYC95；                        调用 LCYC95 循环粗加工轮廓
N50 G00 G96 S80 LIMS=3000 F0.15；   设定精车恒线速度
N55 R105=5；                        调整循环参数
N60 LCYC95；                        调用 LCYC95 循环精加工轮廓
N65 G00 X100 Z150；                 快速退刀
N70 G97；                           取消恒线速度
N75 T02；                           换切槽刀，调整工艺数据
N80 G00 X42 Z−3；                   快速引刀至槽 Z 向左侧
N85 R01=1 R02=8 M03 S250；          设置参数
N90 MK：G91 G01 X−14 FO.2；         MK：循序标号
N95 G04 X1；                        槽底暂停 1s，便于断屑
N100 G01 X14；                      退出
N105 G00 Z−8；                      移至下一个槽加工的位置
N110 R01=R01+1；                    计数器，计算槽加工的个数
N115 IF R01<=R02 GOTOB MK；         条件跳转
N120 G00 G90 X100 Z150 M09；        退刀，关切削液
N125 M30；                          结束程序
```

1.9　子程序调用编程

例 1：内、外螺纹联接头的加工

在数控车床上加工图 1-29 所示工件（毛坯的六方外形及内孔均已成形），试编写其加工程序。

1. 工艺分析

对于右端的圆锥螺纹，其螺纹牙型角为 55°，牙型高度为 1.162mm，圆锥的锥度为 1:16（3.58°）。经计算，圆锥端面处（圆锥小端）的直径为 25.85mm，圆锥大端直径为 27.03mm，螺纹大端处的大径为ϕ26.96mm，Z 向的螺距为 1.814mm。加工此例工件时，先加工左端内、外轮廓，再以工艺内螺纹装夹后加工右端管螺纹，通过子程序调用完成。

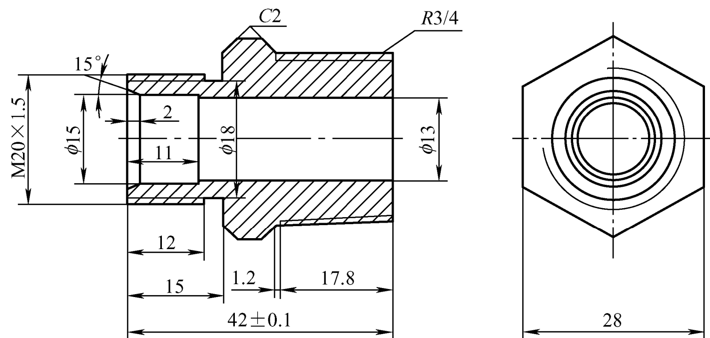


图 1-29 内、外螺纹联接头

2. 编制程序

程序如下：

```
ZUODUAN.MPF;                              加工左端轮廓主程序
N05 G00 G95 G40 G71;
N10 T01D01;                               换外圆车刀
N15 M03 S800 F0.1 M08;
N20 G00 X34 Z2;                           准备调用左端外轮廓子程序
N25 CYCLE95("ZUOWAI",   2.0,    0,    0.3,    , 0.2,  0.2, 0.05,    9,    ,     ,  0.5);
  与 CYCLE95(          NPP, MID, FALZ, FZLX, FAL, FF1, FF2, FF3, VARI, DT, DAM, VRT)各项对应
N30 G00 X100 Z100;
N35 T02 D01;                              换外切槽车刀，刀宽为 3mm
N40 G00 X34 Z−15 S600;
N45 G01 X18;
N50 G00 X34;
N55 X100 Z100;
N60 T03D03;                               换内孔车刀，刀宽为 3mm
N65 G00 X11 Z2 S800;                      准备调用左端内轮廓子程序
N70 CYCLE95("ZUONEI", 1, 0, 0.2, 0, 0.1, 0.1, 0.05, 11, , , 0.5);
N75 G00 X100 Z100;
N80 T04 D04;                              换外螺纹车刀，刀宽为 3mm
N85 G00 X22 Z2 S600;
N90 CYCLE97(1.5, , 0, −12, 20, 20, 2, 2, 0.975, 0.05, 30, , 6, 1, 3, 1);
N95 G00 X32;
N100 G74 X0 Z0;
N105 M30;
```

```
ZUOWAI.SPF;                               加工左端外轮廓子程序
N05 G00 X19.8;
N10 G01 Z−15;
N15 X28.33;
N20 X32.33 Z−17;
```

```
N25 X34；
N30 RET；

ZUONEI.SPF；                                  加工左端内轮廓子程序
N05 G00 X16.07；
N10 G01 Z0；
N15 X15 Z–2；
N20 Z1；
N25 X11.0；
N30 RET；

YOUDUAN.MPF；                                 加工右端外轮廓主程序
N05 G90 G95 G40 G71；
N10 T01 D01；                                 换外圆车刀
N15 M03 S800 F0.1 M08；
N20 G00 X34 Z2；
N25 CYCLE95("YOUWAI ", 2, 0, 0.3, , 0.2, 0.2, 0.05, 9, , , 0.5)；
N30 G00 X100 Z100；
N35 T05 D01；                                 换外螺纹车刀，加工管螺纹
N40 G00 X27 Z2 S600；
N45 CYCLE97(1.81, ,0, −17.8,25.85,26.96,2,0,1.16,0.05,27.5, ,10,1,3,1)；
N50 G74 X0 Z0；
N55 M30；

YOUWAI.SPF；                                  加工右端外轮廓子程序
N05 G00 X25.85；
N10 G01 Z0；
N15 X27.03 Z–19；
N20 X28.33；
N25 X32.33 Z–21；
N30 X34；
N35 RET；
```

例 2：车削加工综合实例

编制图 1-30 所示零件的加工程序，材料为 45 钢，棒料直径为 45mm。

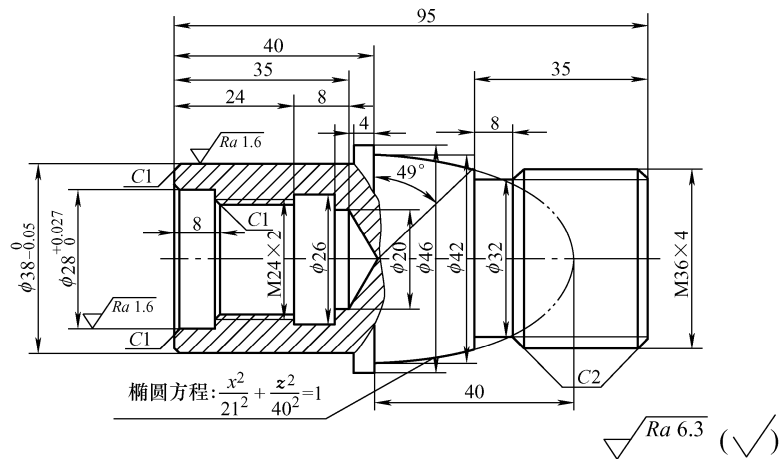


图 1-30　车削加工综合实例

1. 工艺分析

根据零件图样要求和毛坯情况，按先主后次的加工原则，确定工艺方案和加工路线。以工件右端面中心为坐标系原点，设定工件坐标系。根据零件尺寸精度及技术要求，将粗、精加工分开来考虑，确定的加工工艺路线为：

1）夹右端，手动车左端面，用ϕ20mm 麻花钻钻ϕ20mm 底孔。

2）粗、精车左端外形轮廓。

3）粗、精镗孔。

4）用内切槽刀切ϕ26mm×8mm 内孔退刀槽。

5）用内螺纹车刀车削 M24×2 内螺纹。

6）调头夹ϕ38mm 外圆，车右端面，车削总长，用 LCYC95 循环粗、精车右端外形轮廓。

7）用切槽刀、LCYC93 切槽循环切ϕ32mm×8mm 螺纹退刀槽，并用切槽刀右刀尖倒出 M36×4 螺纹左端 C2 倒角。

8）用参数 R 和程序跳转指令车削椭圆曲面。

9）用螺纹车刀、LCYC97 螺纹车削循环车 M36×4 外螺纹。

2. 刀具的选择

本零件加工内容较多，所需刀具的种类也多，主要有ϕ20mm 麻花钻、93°左偏刀、4mm 切槽刀、60°外螺纹车刀、内孔镗刀、3mm 内切槽刀及 60°内螺纹车刀，见表 1-9。

表 1-9　刀具、切削用量及所用指令

刀 具 号	型　号	切 削 用 量			所 用 指 令
		a_p/mm	f/（mm/r）	n/（r/min）	
T01	93°左偏刀	2	0.08	150	G01
			0.18	600	G01
T02	4mm 切槽刀		0.08	400	G01
T03	60°外螺纹车刀		0.12	500	G33
T04	内孔镗刀		0.05	600	G01
T05	3mm 内切槽刀		0.08	300	G01
T06	60°内螺纹车刀	1	0.12	500	G33

3. 编制程序

（1）左端加工程序　程序如下：

ZUODUAN.MPF；	左端加工程序名
N05 G94 G090；	采用绝对值编程，分进给
N10 TRANS X0 Z60；	采用可编程零点偏移
N15 S600 M03 T01 D01；	主轴正转，转速为 600r/min，93°左偏刀
N20 G00 X48 Z0 M08；	快速进刀，切削液开
N25 G01 X18 F80；	已先钻了ϕ20mm 底孔，车左端面
N30 G00 X46.5 Z2；	快速退刀
N35 G01 Z−45 F100；	车外圆至ϕ46mm
N40 G00 X50 Z2；	快速退刀
N45 X40；	进刀
N50 G01 Z−35.8；	车外圆至ϕ40mm
N55 X47；	X 向退刀

N60 G00 Z2；	快速退刀
N65 X38；	进刀
N70 G01 Z0；	进刀
N75 X36 Z–l；	倒角 *C*1
N80 Z–35.8；	车外圆至ϕ38mm
N85 X46；	退刀
N90 G00 Z2；	快速退刀
N95 S850 F100；	转速为 850r/min
N100 X35.975；	进刀
N105 G01 Z0；	进刀
N110 X35.975 Z–1；	倒角 *C*1
N115 Z–36；	精车ϕ38mm 的外圆至尺寸
N120 X46；	进刀
N125 Z–45；	精车ϕ46mm 的外圆至尺寸
N130 X47；	退刀
N135 G00 X100 Z150；	快速退刀
N140 S500 T04 D01；	转速为 500r/min，60° 内螺纹车刀
N145 G00 X21；	进刀
N150 Z2；	进刀
N155 G01 Z–31.9；	粗车 M24×2 的内孔
N160 X19；	退刀
N165 G00 Z2；	退刀
N170 X25；	进刀
N175 G01 Z–8；	粗车ϕ26mm 内孔
N180 X20；	退刀
N185 G00 Z2；	退刀
N190 S600 F50；	转速为 600r/min
N195 X28.015；	进刀
N200 G01 Z0；	进刀
N205 X26.0135 Z–1；	倒角 *C*1
N210 Z–8；	精车ϕ26mm 内孔至尺寸
N215 X24；	进刀
N220 X21.9 Z–9；	倒角 *C*1
N225 Z–32；	精车 M24×2 的内孔至尺寸
N230 X18；	退刀
N235 G00 Z150；	快速退刀
N240 S400 T05 D01；	转速为 400r/min，换 3mm 内切槽刀
N245 G00 X20；	快速进刀
N250 Z–31；	快速进刀
N255 G01 Z–32；	进刀
N260 X26；	切内槽至尺寸
N265 X20；	退刀
N270 Z–29；	退刀
N272 X26；	切内槽至尺寸
N274 X20；	进刀
N276 Z–27；	车削
N278 X26；	退刀
N280 Z–32；	拉平槽底
N285 X20；	退刀
N290 G00 Z15；	快速退刀

```
N295 T06 D01；                     换 60°内螺纹车刀
N300 X22.9；                       进刀
N305 Z−6；                         进刀
N310 G33 Z−26 K2；                 车削内螺纹 M24×2
N315 G00 X21；                     退刀
N320 Z−6；                         退刀
N325 X23.6；                       进刀
N330 G33 Z−26 K2；                 车削内螺纹 M24×2
N335 G00 X21；                     退刀
N340 Z−6；                         退刀
N345 X23.8；                       进刀
N350 G33 Z−26 K2；                 车削内螺纹 M24×2
N355 G00 X21；                     退刀
N360 Z−6；                         退刀
N365 X23.9；                       进刀
N370 G33 Z−26 K2；                 车削内螺纹 M24×2
N375 G00 X21；                     退刀
N380 Z−6；                         退刀
N385 X24；                         进刀
N390 G33 Z−26 K2；                 车削内螺纹 M24×2
N395 G00 X21；                     退刀
N400 Z150；                        Z 向快速退刀
N405 X100 M09；                    X 向快速退刀，切削液关
N410 M30；                         程序结束并返回起点
```

（2）右端加工程序　程序如下：

```
YOUDUAN.MPF；                      右端加工程序名
N10 G94 G90；                      采用绝对值编程，分进给
N20 TRANS X0 Z60；                 采用可编程零点偏移
N30 S600 M03 T01 D01 F80；         主轴正转，转速为 600r/min，换 93°左偏刀
N40 G00 X50 Z0 M08；               快速进刀，切削液开
N50 G01 X−0.5；                    车端面（取总长）
N60 G00 X50 Z2；                   快速退刀
N70 CYCLE95("PUTE"，2，0.2，0.3，0.5，200，50，100，9，0，0，2)
N80 S1200 F50；                    转速为 1200r/min
N90 PUTE；                         调用子程序
N100 G00 X100 Z100；               快速退刀
NIl0 S400 T02 D01；                转速为 400r/min，换 4mm 切槽刀
N115 G00 X42；                     快速进刀
N120 Z−55；                        快速进刀
N130 CYCLE93(40，−51，8，4，0，0，0，0，0，0，0，0.3，0.2，2，1，5)
N140 X33；                         进刀
N150 G01 X32；                     进刀
N160 Z−51；                        进刀
N170 X36 Z−49；                    倒角 C2
N180 G00 X50；                     X 向快速退刀
N190 Z150；                        Z 向快速退刀
N200 S650 T03 D01；                转速为 650r/min，换 60°外螺纹车刀
N210 X35.8 Z−25；                  快速进刀
N220 CYCLE97(4，0，−27，−47，36，36，4，3，1.24，0.05，0，0，2)：
N230 G00 X100 Z150；               快速退刀
N240 M30；                         程序结束并返回起点
```

（3）右端外圆循环子程序　程序如下：

PUTE.SPF；	子程序名
N05 G01 X0 Z0；	进刀
N10 X32；	进刀
N15 X36 Z−2；	倒角 *C*2
N20 Z−25；	车 M36×4 的外圆
N25 X42；	进刀
N30 Z−55；	车ϕ40mm 外圆
N35 X50；	退刀
N40 M17；	子程序结束

（4）右端椭圆主程序（以工件的右端面为编程坐标系）　程序如下：

TUOYUAN.MPF；	椭圆主程序名
N10 G54 G90 G94；	采用绝对值编程，分进给
N20 T01 D01；	93°左偏刀，1 号刀补
N30 M03 S600；	主轴正转，转速为 600r/min
N35 G00 X44 Z−53；	快速进刀定位
N40 R20=5 F100；	设置 *X* 向偏移值（椭圆粗加工）
N50 MAI：TRANS X=R20；	用可编程零点偏移 *X* 值
N60 TUOZHI；	调用子程序
N70 R20=R20−1；	每走一刀后，*X* 向缩刀 1mm
N80 IF R20>=0.3 GOTOB MAI；	条件转移
N85 G00 X50 Z−53；	快速定位
N90 TRANS；	取消可编程零点偏移
N100 X=0；	*X* 偏移值设置为零（椭圆精加工）
N120 S1200 M03；	主轴正转，转速为 1200r/min
N130 TUOZHI；	调用子程序
N140 G00 X100 Z100；	快速退刀
N150 M30；	程序结束

（5）椭圆子程序　程序如下：

TUOZHI.SPF；	子程序名
N05 G64 G90 G00 X=40*TAN(41)Z−35；	进刀
N10 G01 Z−55 F50；	起刀点
N15 R01=40 R02=21 R03=41；	赋长半轴、短半轴、起始角、终止角的值
N20 MA2：R04=2*R02*SIN(R03) R05=R01*COS(R03)−55；	*X*、*Z* 表达式
N25 G01 X=R04 Z=R05；	车削椭圆
N30 R03=R03+0.5；	每走一刀后 *Z* 方向增加 0.5mm
N35 IF R04>46 GOTOF MK3；	
N40 IF R03<=R04 GOTOB MK2；	
N45 MA3：G91 G00 X2；	退刀
N50 G90 Z2；	退刀
N55 RET；	子程序结束及返回

第 2 章　SINUMERIK 840D 数控铣削编程

2.1　数控加工工艺分析

相关知识点

1. 审图

审图是工艺分析与程序编制之前的必要步骤，应从如下几个方面进行：

1）检查零件图的完整性和正确性。

2）检查零件视图是否正确、足够。

3）检查几何元素的给定条件是否充分。

4）检查表达是否直观、清楚。

5）检查绘制是否符合国家标准。

6）精度及技术要求分析。

7）定位基准分析。

2. 选择数控铣削的加工内容

与普通铣床相比，数控铣床能加工形状复杂、精度要求高的零件，但其价格、加工成本也相应较高。在选择数控铣床的加工内容时，应从实际需要和经济性两个方面综合考虑。通常选择下列部位为其加工内容：

1）件上的曲线轮廓。指要求有内、外复杂曲线的轮廓，特别是由数学表达式等给出其轮廓为非圆曲线和列表曲线等曲线轮廓。

2）空间曲面。由数学模型设计出的，并具有三维空间曲面的零件。

3）形状复杂、尺寸繁多、加工与检测均很困难的部位。

4）使用通用铣床加工难以或不便观察、测量和控制进给的内外凹槽。

5）高精度零件。尺寸精度、几何精度和表面粗糙度等要求较高的零件。如发动机缸体上的多组高精度孔或型面。

6）能在一次安装中顺带加工出简单表面，以减少装夹次数。

7）采用数控铣削后能成倍提高生产率，大大减轻体力劳动强度的一般加工内容。

虽然数控铣床加工范围广泛，但是因受数控铣床自身特点的制约，某些零件仍不适合在数控铣床上加工。

3. 平面轮廓的进给路线

（1）铣削外轮廓的进给路线　一般用立铣刀切削。为保证加工能光滑过渡，应避免沿零件外轮廓的法向切入，以免在切入处产生刀具的刻痕，而应沿切削起始点延伸线或切线方向逐渐切入工件，保证零件曲线的平滑过渡。同样，在切离工件时，也应避免在切削终点处直接抬刀，要沿着切削终点延伸线或切线方向逐渐切离工件。

加工中要尽量避免在进给中途停顿，因为加工过程中零件、刀具、夹具、机床工艺系统在弹性变形状态下平衡，若进给停顿则切削力会减小，切削力的突变就会使零件表面产生变形，在零件表面上留下凹痕。

（2）铣削封闭内轮廓的进给路线　铣削封闭内轮廓的进给路线　同铣外轮廓一样，刀具同样不能沿轮廓曲线的法向切入和切出，而须沿一过渡圆弧切入和切出。当无法使用过渡圆弧，或必须沿法线方向切入和切出时，切入和切出点则应选在零件轮廓两几何要素的交点上，而且进给过程中要避免停顿。

（3）铣削内槽的进给路线　所谓内槽是指以封闭曲线为边界的平底凹槽。这种内槽用平底立铣刀加工，刀尖圆弧半径应符合内槽的图样要求，有三种进给方法：

1）行切法。从槽的一边一行一行地切到槽的另一边。特点：进给路线短，不留死角，不伤轮廓，减少了重复进给的搭接量。缺点：每两次进给的起点与终点间留下了残留面积，而达不到要求的表面粗糙度。

2）环切法。从槽的中间逐次向外扩展进行环形走刀，直至切完全部余量。特点：进给路线比行切法长，表面质量也好于行切法，是一种较好的进给方式。缺点：刀位点计算较复杂。

3）综合法。先用行切法切去中间部分余量，最后用环切法切一刀。特点：综合了行、环切法的优点，既能使总的进给路线较短，又能光整轮廓表面，获得较低的表面粗糙度值。

例 1：平面槽凸轮的数控铣削工艺分析

1. 审图

图 2-1 所示为平面槽凸轮，主要分析凸轮轮廓形状、尺寸和技术要求、定位基准及毛坯状况等。此平面槽凸轮的轮廓由四段圆弧和两段直线组成。需使用两轴联动的数控铣床。材料为铸铁，切削加工性好，稳定不变形。凸轮槽侧面与 $\phi20^{+0.021}_{0}$ mm、$\phi12^{+0.018}_{0}$ mm 两个内孔表面质量要求较高，凸轮槽内、外轮廓面和 $\phi20^{+0.021}_{0}$ mm 孔与底面有垂直度要求。

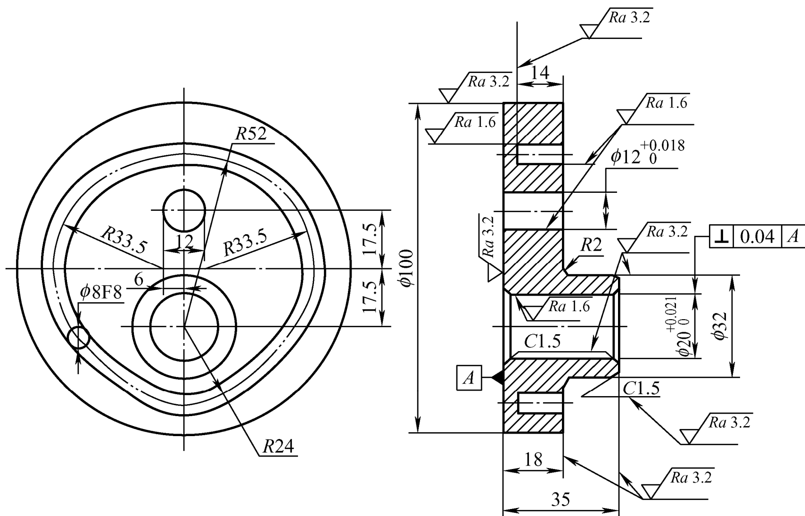


图 2-1　平面槽凸轮

2. 加工方案

根据上述分析，凸轮槽内、外轮廓侧面与 $\phi20^{+0.021}_{0}$ mm、$\phi12^{+0.018}_{0}$ mm 两个内孔表面质量

要求较高，凸轮槽内、外轮廓面和$\phi 20^{+0.021}_{0}$mm孔与底面有垂直度要求。因此，应分别用粗、精加工两个阶段完成。凸轮槽内、外轮廓由粗铣、精铣完成；$\phi 20^{+0.021}_{0}$mm、$\phi 12^{+0.018}_{0}$mm两个孔采取钻、扩、铰的方法加工。

3. 选择数控加工内容

根据数控加工的特点，选择普通机床无法加工或加工难度大、质量难以保证的内容作为数控加工的优先内容。因此凸轮槽内、外轮廓应选作数控铣削加工的内容，其余则由普通机床来完成。

4. 装夹方案的选择

对于一般小型凸轮，可利用凸轮上的装配孔用心轴定位、压紧即可；对于大型凸轮，一般可用等高垫块垫在工作台上，然后用压板螺栓在凸轮的孔上压紧；若为外轮廓平面盘状凸轮，垫块要垫在凸轮轮廓形面以内，避免在加工时与铣刀发生干涉。根据本平面槽凸轮的结构特点，最适宜采用“一面两孔”定位，故需设计一“一面两销”专用夹具。加工前先固定垫块，使两定位销孔的中心连线与机床的X轴平行，垫块的平面要保证与工作台面平行，并用百分表检查。

5. 进给路线的确定

进给路线包括平面内进给和深度进给两部分。

（1）平面内进给　外凸轮廓从切线方向切入，内凹轮廓从过渡圆弧切入（图2−2）。

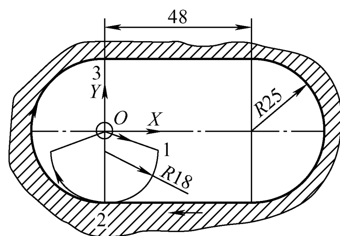


图2−2　过渡圆方式切入切出

注：图中序号为加工顺序。

（2）深度进给　有两种方法：

1）在OXY（或OYZ）平面内来回铣削，逐步进给到需要的深度。

2）先钻一工艺孔（落刀孔），然后从工艺孔进给到所需深度。进刀点应选在圆弧与直线的交点上，两种进给方法均可以。铣削方式采用顺铣，因为顺铣方式具有功率消耗小、刀具磨损小、工作平稳、振动小、表面粗糙度值低等优点，即从进刀点开始，铣外凸轮廓时，顺时针方向进给；铣内凹轮廓时，逆时针方向进给。

6. 刀具及切削用量的选择

该工件材料为铸铁，为典型的脆性材料，切削生成崩碎切屑，被切金属层频繁地无规则断裂，使切削过程不太平稳，对切削刃有很大的冲击，因此就要求刀具材料具有较高的强度和冲击韧性。粗铣选用高速钢立铣刀，精铣选用YG类硬质合金立铣刀。

YG类硬质合金与YT类相比，具有较高的抗弯强度和冲击韧性。另外，YG类比YT类有较好的导热性能，有利于切削热从“刃区”传散，降低刃区温度。因此，YG类硬质合金是目前加工铸铁最合适的刀具材料。YG8适合于余量不均匀的粗铣加工，YG6、YG3适合于均匀余量的粗、精铣削。

硬质合金刀具切铸铁时宜采用比切削钢时较低的切削速度。切削用量的选用规律是：工件材料的硬度越高经济切削速度越低；粗加工时背吃刀量和进给量大，切削速度低；精加工时被吃刀量和进给量小，切削速度高。

本例粗铣选用ϕ6mm高速钢细齿立铣刀（为什么选ϕ6mm不选ϕ8mm的刀一次将内外轮

廓表面同时加工出？原因是：凸轮槽的槽宽尺寸是 8F8mm，若用ϕ8mm 的铣刀，则不能保证槽宽精度，用ϕ6mm 的铣刀可通过程序采用“两边靠”的方法保证槽宽精度），精铣选用ϕ6mm 硬质合金细齿立铣刀。主轴转速和进给速度是：主轴转速粗铣取 1100r/min，精铣取 1495r/min；进给速度粗铣取 40mm/min，精铣取 20mm/min，刀具及切削用量见表 2-1。

槽深 14mm 分三次完成，第一次背吃刀量 8mm，第二次 5mm，剩余的 1mm 在精铣轮廓时一起完成。凸轮槽两侧面精铣余量留 0.3～0.5mm 即可。

表 2-1　刀具及切削用量

工　步　号	工 步 内 容	刀　　号	刀具规格/mm	主轴转速/（r/min）	进给速度/（mm/min）	背吃刀量/mm
1	粗铣凸轮槽内轮廓	T01	ϕ6	1100	40	4
2	粗铣凸轮槽外轮廓	T01	ϕ6	1100	40	4
3	精铣凸轮槽内轮廓	T02	ϕ6	1495	20	14
4	精铣凸轮槽外轮廓	T02	ϕ6	1495	20	14

例 2：链轮的数控铣削工艺分析

链轮是链传动的齿形零件，它的齿形是由几段圆弧组成的，小型链轮是用成形铣刀在万能铣床上借助分度头进行加工的，所以，要加工不同的链轮廓，就要设计不同的链轮铣刀。如果是大型链轮，就要设计大的链轮铣刀。图 2-3 所示的链轮，齿形最大圆周弧长为 292mm，其设计的指状铣刀直径要 300mm，制造成本高，很不经济。

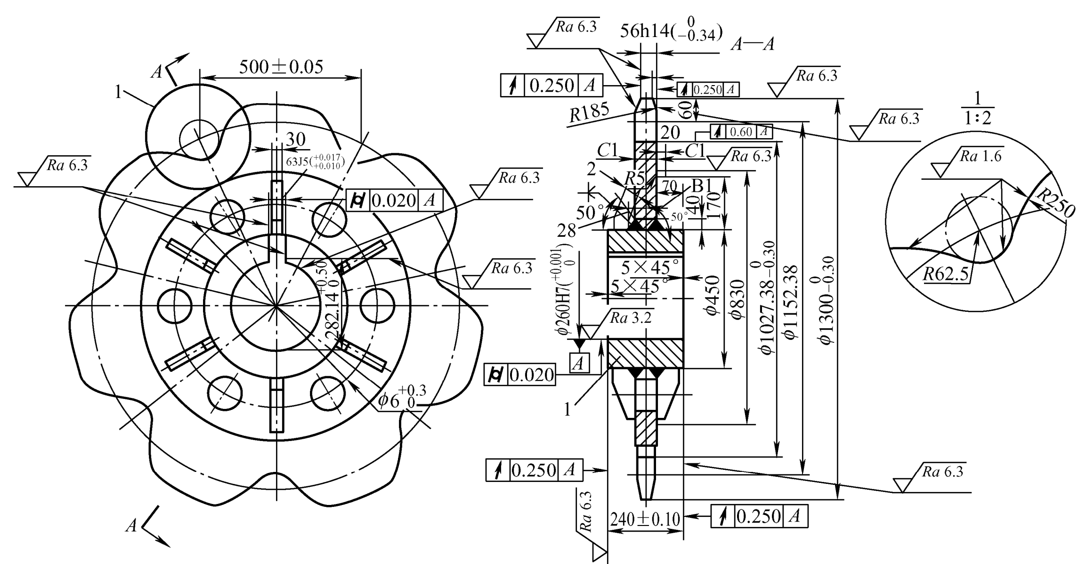


图 2-3　链轮

1—轮芯　2—轮圈

如果采用数控程序加工，就可以用普通圆柱铣刀加工链轮的齿形，节省专用刀具的设计和制造费用，还可以缩短生产准备周期。

1．零件加工工艺分析

（1）结构分析　此零件为焊接结构，轮芯为 45 钢，是典型的套类零件。成形轮廓的结

构形状并不复杂，但齿形的精度要求很高，根据零件尺寸和调质硬度要求，要在粗加工后进行调质处理，链轮的齿形加工是重要工序，工件的加工可考虑数控车削加工中心、数控铣床或加工中心，粗铣链轮齿的刀具可考虑用“硬质合金螺旋齿”铣刀，精铣链轮齿用“钴高速钢螺旋齿”铣刀，以减小刀具的磨损，保证齿形的精度。

（2）精度分析　链轮齿形的轨迹精度要求高。在数控铣削加工中，该零件属等分回转类等分控制加工。零件圆周上的齿沟轮廓由曲线轨迹连接组成，齿沟形状复杂，有严格的齿形等分要求，并且要求曲线必须圆滑连接过渡，加工精度高。所以该零件铣削加工的轮廓轨迹复杂，加工难度大，尺寸精度和几何精度要求较高。

在数控车削加工中，零件重要的径向加工部位有$\phi\ 1300_{-0.30}^{\ 0}$ mm 齿顶圆和ϕ260H7 的圆柱孔，零件轴向与径向加工部位的尺寸按 d8 级精度取值即可。在数控车削加工中零件的轴向定位以零件右端面为准，在数控铣削加工中，零件重要的加工部位是链轮的齿形。查阅《链轮轮齿加工手册》，可得链轮零件基准孔ϕ260H7 的公差为 0.063mm，齿顶圆ϕ1300mm 的公差为 0.30mm，分度圆尺寸为ϕ1152.38mm，齿根圆$\phi 1027.38_{-0.30}^{\ 0}$的径向圆跳动为 0.60mm，链轮齿形的径向圆跳动为 0.15mm。

（3）毛坯余量分析　毛坯零件由车削加工完成，所以数控铣削加工部位为链轮轮齿，链轮轮齿各处的切削余量不均匀，尤其是齿沟处切削余量较大，在切削过程中会产生变形。因此，轮齿的加工应该分粗铣加工和精铣加工。

（4）技术要求与工艺性分析　零件的技术要求：链轮材料为 40Cr，调质硬度为 235～256HB，齿表面淬火至 40～45HRC。零件被加工表面轮廓的最大高度为 240mm，零件轮廓的加工高度为 56mm，由此可以判断，其铣削工艺性较好，并制订出其加工工艺过程为：焊—粗车—调质—精车—钻孔—铣齿—钳工—装配，再将零件数控加工工序和加工中的其他工序相互衔接好。

（5）零件装夹方式分析　零件的周边轮廓由曲线构成，要求的精度较高。根据数控加工的特点，可以采用下列方式来进行零件轮廓的数控铣削加工。

装夹方式Ⅰ：

将零件装夹在自定心卡盘上，再将自定心卡盘固定在铣床工作台上，利用 *X* 轴、*Y* 轴联动运行直线圆弧轨迹，用多段曲线连接来完成零件一个轮齿形状的数控加工，而后依次在零件圆周处进行各轮齿的数控加工。采用装夹方式Ⅰ装夹加工零件的优点是简便易行，敞开了加工中铣刀运行的空间，所以轮廓精度较为理想。不足之处是，由于轮齿在链轮圆周上呈均匀等分分布，所以曲线节点的计算异常复杂，而且轮廓曲线的各节点均应呈现为圆滑相切过渡，这就加大了轨迹曲线各节点坐标（包括圆心坐标、圆弧半径）的计算量，而且存在加工轨迹的计算误差。这是一般情况下采用的装夹方式。

装夹方式Ⅱ：

将零件固定在数控回转工作台上，再将数控回转工作台固定在铣床工作台上，利用 *X* 轴、*Y* 轴联动运行直线圆弧轨迹，用多段曲线连接来完成零件一个轮齿形状的数控加工后，再利用数控回转工作台的旋转运动，完成链轮的分齿运动；重复上述运动直至完成链轮齿形的全部加工。采用装夹方式Ⅱ，零件轮廓精度较为理想，计算简单，而且加工误差小。装夹方式Ⅱ适合单件和中小批量的链轮加工。

显而易见，装夹方式Ⅱ优于装夹方式Ⅰ。采用装夹方式Ⅱ进行链轮的数控铣削加工如图 2-4 所示，先将底座装夹在工作台合适位置上，用压紧螺钉 4 紧固工件。用固定螺钉 7 压紧。然后安放链轮和压盖，以外圆和端面找正。在链轮定位和夹紧后，要用百分表或寻边器（一种用于对刀、工件定位的精密仪器）建立工件坐标系，使主轴对准孔中心，获得 X、Y 的机床零点偏移值；将主轴端面的零点设置在孔的端面上。

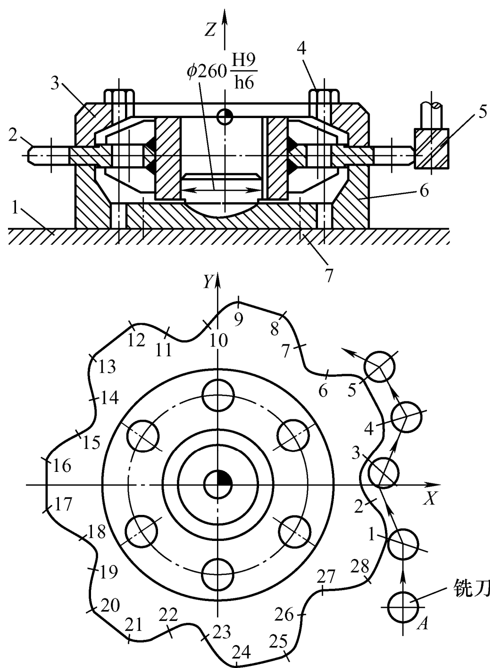


图 2-4　采用装夹方式Ⅱ进行链轮的数控铣削加工

1—工作台　2—工件　3—压盖　4—压紧螺钉

5—铣刀　6—底座　7—固定螺钉

2．加工使用的设备、辅具与材料

1）此实例在 SIEMENS 数控系统的立式数控铣床上进行实际调试和加工。

2）配备零件毛坯一件。

3）配备数控回转工作台、螺栓、垫铁、压板、压紧螺栓等相关的装夹工装辅具。

4）配备刀具：粗铣链轮齿用“硬质合金螺旋齿”铣刀，精铣链轮齿用“钴高速钢螺旋齿”铣刀，选ϕ90mm 链轮指形铣刀 2 把，用于粗铣、半精铣加工。

点　评

1．工艺分析项目

1）尽量统一凹圆弧半径的尺寸，即使不能完全统一，也应力求局部统一。

2）各要素的形状是否简单，加工面积是否小，规格标准是否统一。

3）刀具是否容易进入，退出和顺利通过加工表面。

4）加工面与非加工面是否明显分开，加工面之间是否明显。

5）零件结构上对刀具数量或工件装夹次数的影响。

6）零件结构刚性，是否容易变形。

零件工艺结构性分析对制造质量、成本影响很大，需要重视。

2．尺寸标注应符合数控加工的特点

在数控编程中，所有点、线、面的尺寸和位置都是以编程原点为基准的。因此零件图上最好直接给出坐标尺寸，或尽量以同一基准引注尺寸。

3．分析几何元素的给定条件是否充分

常常出现参数不全或不清楚，或图样上给定几何条件自相矛盾的情况，如圆弧与直线、圆弧与圆弧是相切还是相交或相离。所以在审查与分析图样时，一定要仔细。

2.2　直线插补编程

例 1：五角星与五边形加工

加工图 2-5 所示的五角星与五边形，外圆及方台已加工好，在 SINUMERIK 840D 立式铣床上采用两轴直线插补运动加工，五角星轮廓相交处为铣刀半径圆弧过渡，起刀点设在（0，−33），选用ϕ12mm 的立铣刀，并考虑刀尖圆弧半径补偿（简称刀补），试编写五角星与五边形加工程序。

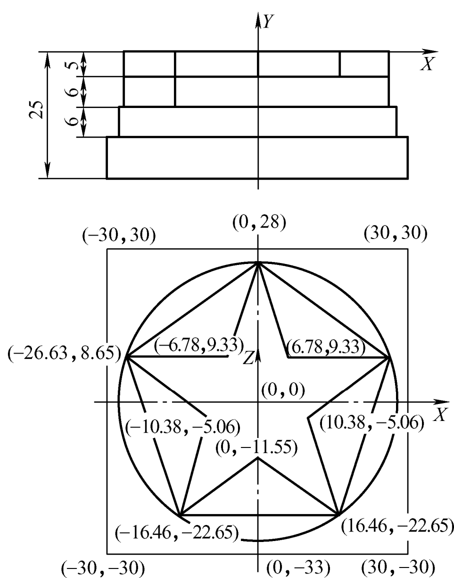


图 2-5　五角星与五边形

```
ZXCB1.MPF;                      主程序
N05 G54 G90 G00 Z40;            建立加工坐标系
N10 M03 S500 F200;              主轴起动
N15 G01 Z−11;                   五边形下刀
N20 X0 Y−33;                    走到起始点，
N25 G42 D02 X16.46 Y−22.65;     完成刀补
N30 X26.63 Y8.65;               加工五边形开始
N35 X0 Y28;                     切削轮廓
N40 X−26.63 Y8.65;              切削轮廓
N45 X−16.46 Y−22.65;            切削轮廓
N50 X16.46 Y−22.65;             加工五边形结束
N55 G01 Z−5;                    准备加工五角星
N60 X10.38 Y−5.06;              加工五角星开始
N65 X26.63 Y8.65;               切削轮廓
N70 X6.78 Y9.33;                切削轮廓
M75 X0 Y28;                     切削轮廓
N80 X−6.78 Y9.33;               切削轮廓
N85 X−26.63 Y8.65;              切削轮廓
N90 X−10.38 Y−5.06;             切削轮廓
N95 X−16.46 Y−22.65;            切削轮廓
N100 X0 Y−11.55;                切削轮廓
N105 X16.46 Y−22.65;            五角星加工结束
N110 X30 D00;                   X 坐标退刀并用 D00 取消刀补
N115 Z30 M05;                   主轴停止，抬刀
N120 M30;                       程序结束
```

点　评

本例是利用 G01 指令加工一个简单零件，其关键一是工件坐标的计算，二是工件坐标偏置 G54 的设定，三是刀补指令 G42 的使用。关于工件坐标的计算，视零件的难易程度及图样的标注情况，这需要具备必要的数学知识，在大多数情况下，编程计算所用的数学知识并不是很深，利用三角函数与平面几何知识就可以解决绝大多数零件的坐标计算。本例是通过具体的坐标值编写的程序，无通用性，应用范围受到限制，只有编写 R 参数子程序才具有广泛的通用性。

例 2：三轴直线插补运动

如图 2-6 所示，一个圆滑板工件上面分布有若干油槽，油槽的槽底深浅不一，便于润滑油的流动，也就是说加工的油槽是空间油槽：刀具要在 *OXY* 平面上从起始点移动到终点，*Z* 轴也同时进给。用指令 G01 完成三轴直线插补运动，槽底形状用成形铣刀（*R*4mm 的球头刀）保证。

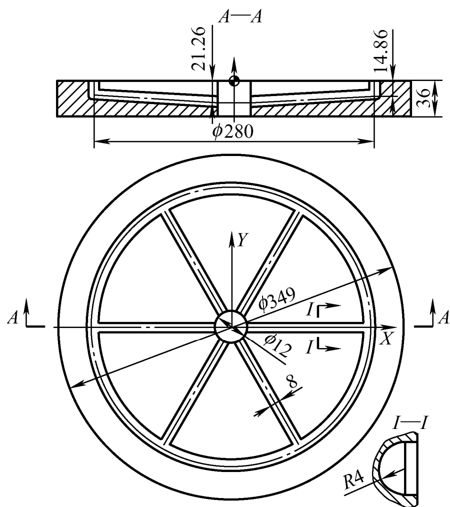


图 2-6　圆滑板空间油槽

1．零件的加工工艺分析

滑板为薄壁零件，主要考虑变形问题，选定在数控铣床上加工，要求在上道工序中留有本工序所需的压点位置，按上道工序已加工的面为基准，打表找正工件，并用压板压紧工件，油孔及油槽的表面粗糙值度一般为 *Ra*12.5 μm 或 *Ra*6.3μm，可一次加工出来。由于球头刀不便垂直下刀，为了加工方便，先用ϕ12mm 的钻头将中间孔钻通，再用ϕ8mm 的球头刀把六条辐射槽加工出来，最后再用ϕ10mm 的球头刀加工环形槽，注意槽深尺寸是按球心位置标注的。

2．编制程序

```
CHAO.MPF；                                        主程序名
N05 G90 G17 S400 M03；                             选择工作平面，主轴起动
N10 T01 D01；                                      换ϕ12mm 钻头
N15 G00 X0 Y0 Z5；                                 到达起始位置
N20 M03 S700 F130；
N25 G01 Z−40 F150；                                钻通孔
N30 Z10；
N35 G00 X400 Y0 M05；                              到换刀点
N40 T02 D02；                                      换ϕ8mm 球头刀
N45 G00 X0 Y0 Z5；                                 走到工件中心位置
N50 M03 S700 F130；
N55 G01 Z−21.26；                                  走到最低点，开始加工六条空间油槽
N60 X140 Y0 Z−15.3；
N65 Z5；
N70 G00 X0 Y0；                                    走到工件中心位置
N75 G01 Z−21.26；                                  走到最低点，开始加工六条空间油槽
N80 G01 X=140*COS(60) Y=140*SIN(60)Z−14.86 ；
N85 Z5；                                           程序中的乘号只能用“*”，不能用“×”或“·”
N90 G00 X0 Y0；                                    走到工件 中心位置
N95 G01 Z−21.26；                                  走到最低点，开始加工六条空间油槽
N100 X=140*COS(120) Y=140*SIN(120) Z−14.86
N105 Z5；
N110 G00 X0 Y0；                                   走到工件中心位置
N115 G01 Z−21.26；                                 走到最低点，开始加工六条空间油槽
N120 X−140 Y0 Z−15.3；
N125 Z5；
N130 G00 X0 Y0；                                   走到工件 中心位置
```

```
N135 G01 Z−21.26;                         走到最低点，开始加工六条空间油槽
N140 X=140*COS(240) Y=140*SIN(240) Z−14.86
N145 Z5;
N150 G00 X0 Y0;                           走到工件中心位置
N155 G01 Z−21.26;                         走到最低点，开始加工六条空间油槽
N160 X=140*COS(300) Y=140*SIN(300) Z−14.86
N165 Z10;
N170 G00 X400 Y0 M05;                     到换刀点
N175 T03 D03;                             换φ10mm 球头刀
N180 G00 X140 Y0 Z5;
N185 M03 S700 F130;
N190 G01 Z−15.3;                          下刀，开始加工环形油槽
N195 X140 G03 Y0 I=−140 J=0
N200 G01 Z10;
N205 G00 X400 Y0 M05;                     退到换刀点
N210 M30;                                 程序结束
```

点　评

本例中，应用了三轴直线插补，大多数情况下用两轴插补，空间复杂的曲面零件通过直线逼近方法用三轴联动方法实现，有些还带有摆动轴可实现三轴以上联动。程序中还利用了带有函数计算功能的 SINUMERIK840D 系统，可直接计算出坐标点，如 N80 程序段：N80 G01 X=140*CON(60) Y=140*SIN(60) Z−15.3，以后还将看到利用各种函数编程的例子。本例中，六条辐射状油槽是等分角度的，还可以利用极坐标编程，甚至还可按“等分角度”规律，利用循环功能编程，总之，编程方法较多，本例仅为其中一种方法罢了。

2.3　圆弧插补编程

相关知识点

对于图 2−7 所示的圆滑板空间油槽，SINUMERIK 圆弧编程的几种形式如下：

1. 半径（CR=）方式

G03 X21.71 Y40 CR=30;

2. 圆心坐标（I，J，K）增量方式

G03 X21.71 Y40 I22.36 J20;

I =圆心的 X 坐标−圆弧起点的 X 坐标

J =圆心的 Y 坐标−圆弧起点的 Y 坐标

K =圆心的 Z 坐标−圆弧起点的 Z 坐标

3. 圆心坐标（AC）绝对方式

G03 X21.71 Y40 I=AC（50） J=AC（50）;

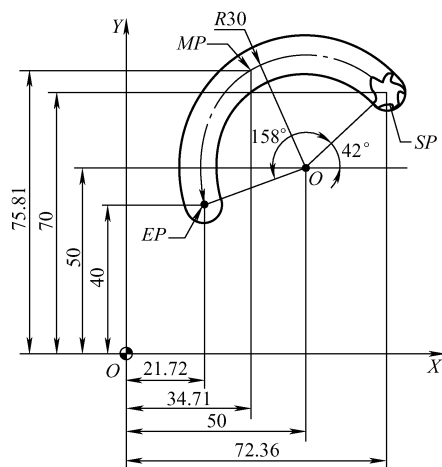


图 2−7　圆滑板空间油槽

4. 极坐标方式

G111 X50 Y50；

G03 G17 AP=200 RP=30；

5. 圆心角（AR）方式

G03 AR=158 I=AC（50）　J=AC（50）；

6. 三点圆弧编程（CIP）方式

CIP X21.71 Y40 I1=34.71 J1=AC（75.81）；

例 1：六轮圆弧板零件的加工

图 2-8 所示的六轮圆弧板，其材料为铝合金，要求加工外轮廓和内孔，加工深度为 10mm，相应坐标图中已给出。

1. 工艺分析及加工路线的确定

1）上机床前应将工件上、下表面加工平整。

2）轮廓加工路线：①外轮廓 1—2—3…；②钻中心孔；③钻孔。

2. 加工刀具选择

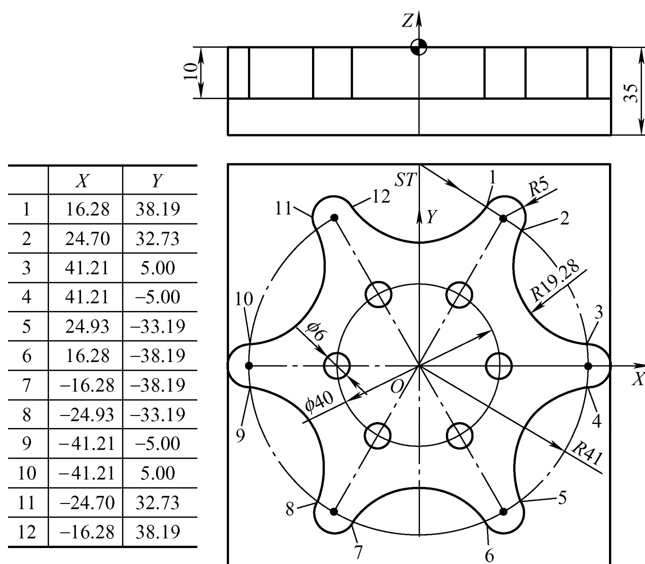
外轮廓用 ϕ8mm 的平铣刀加工，ϕ6mm 的孔先用 ϕ3mm 中心钻定中心，再用 ϕ6mm 的钻头钻孔，所用刀具见表 2-2。

表 2-2　刀具表

刀　号	刀 具 名 称	刀 具 规 格	用　途
T01	立铣刀	ϕ8mm	铣外轮廓
T02	中心钻	ϕ3mm	定中心
T03	钻头	ϕ6mm	钻孔

3. 设定坐标系及坐标

六轮圆弧板零件坐标设定及各基点坐标值图 2-9 中已标出，起刀点设在 *ST*（0，48.53）点的位置，并在毛坯空档处，用压板固定在机床工件台面上。



	X	Y
1	16.28	38.19
2	24.70	32.73
3	41.21	5.00
4	41.21	−5.00
5	24.93	−33.19
6	16.28	−38.19
7	−16.28	−38.19
8	−24.93	−33.19
9	−41.21	−5.00
10	−41.21	5.00
11	−24.70	32.73
12	−16.28	38.19

图 2-8　六轮圆弧板

4．编制程序

程序如下：

LIULUN.MPJ；	六轮圆弧板零件主程序
N05 M06 T01；	ϕ8mm 的平铣刀
N10 G90 S1000 M03；	
N15 G00 Z50 X0 Y48.53；	
N20 G01 Z−10 F100；	下刀
N25 G41 D01 X16.28 Y38.19；	到 1 点并完成刀补
N30 G03 X24.70 Y32.73 CR=5；	到 2 点加工 R5mm 的圆弧
N35 G02 X41.21 Y5 CR=19.28；	到 3 点加工 R19.28mm 的圆弧
N40 G03 X41.21 Y−5 CR=5；	到 4 点加工 R5mm 的圆弧
N45 G02 X24.93 Y−33.19 CR=19.28；	到 5 点加工 R19.28mm 的圆弧
N50 G03 X16.28 Y−38.19 CR=5；	到 6 点加工 R5mm 的圆弧
N55 G02 X16.28 Y−38.19 CR=19.28；	到 7 点加工 R19.28mm 的圆弧
N60 G03 X−24.93 Y−33.19 CR=5；	到 8 点加工 R5mm 的圆弧
N65 G02 X−41.21 Y−5 CR=19.28；	到 9 点加工 R19.28mm 的圆弧
N70 G03 X−41.21 Y5 CR=5；	到 10 点加工 R5mm 的圆弧
N75 G02 X−24.70 Y32.73 CR=19.28；	到 11 点加工 R19.28mm 的圆弧
N80 G03 X−16.28 Y38.19 CR=5；	到 12 点加工 R5mm 的圆弧
N85 G02 X16.28 Y38.19 CR=19.28；	到 1 点加工 R19.28mm 的圆弧
N90 G02 X19.28 Y48.53 CR=19.28；	以 R19.28mm 的圆弧切出
N95 G00 Z100；	抬刀
N100 M05；	
N105 G40 G0l X200 Y0；	
N110 T02 M06；	换ϕ3mm 的中心钻
N115 G90 G94 S1200 M03；	
N120 G00 Z2；	
N125 X=20*COS(0) Y=SIN(0)；	走到第一个ϕ6mm 孔的位置
N130 G01 Z−2 Y80 F120；	打第一个ϕ6mm 中心孔
N135 G00 Z2；	
N140 X=20*COS(60) Y=SIN(60)；	走到第二个ϕ6mm 孔的位置
N145 G01 Z−2；	打第二个ϕ5mm 中心孔
N150 G00 Z2；	
N155 X=20*COS(120) Y=SIN(120)；	走到第三个ϕ6mm 孔的位置
N160 G01 Z−2；	
N165 G00 Z2；	
N170 X=20*COS(180) Y=SIN(180)；	走到第四个ϕ6mm 孔的位置
N175 G0l Z−2；	
N180 G00 Z2；	
N185 X=20*COS(240) Y=SIN(240)；	走到第五个ϕ6mm 孔的位置
N190 G01 Z−2；	
N195 G00 Z2；	
N200 X=20*COS(240) Y=SIN(240)；	走到第六个ϕ6mm 孔的位置
N205 G01 Z−2；	
N210 G00 Z150；	
N215 M05；	

```
N220 G40 G0l X200 Y0；
N225 T02 M06；                              换φ6mm 的钻头
N230 G90 G94 S1200 M03；
N235 G00 Z2；
N240 X=20*COS(0)Y=SIN(0)；                  走到第一个φ6mm 孔的位置
N245 G01 Z–2 Y80；                          钻第一个φ6mm 中心孔
N250 G00 Z2；
N255 X=20*COS(60) Y=SIN(60)；               走到第二个φ6mm 孔的位置
N260 G01 Z–2；                              钻第二个φ6mm 中心孔
N265 G00 Z2；
N270 X=20*COS(120) Y=SIN(120)；             走到第三个φ6mm 孔的位置
N275 G01 Z–2；
N280 G00 Z2；
N285 X=20*COS(180) Y=SIN(180)；             走到第四个φ6mm 孔的位置
N290 G0l Z–2；
N295 G00 Z2；
N300 X=20*COS(240) Y=SIN(240)；             走到第五个φ6mm 孔的位置
N305 G01 Z–2；
N310 G00 Z2；
N315 X=20*COS(240) Y=SIN(240)；             走到第六个φ6mm 孔的位置
N320 G01 Z–2；
N325 G00 Z150；
N330 M30；
```

点　评

1）圆弧插补指令用的是 CR 半径编程方式，也可用 IJK 方式编程，还有其他四种方式，具体用哪种方式，取决于图样的尺寸标注方式以及坐标点计算的方便程度，对于本例中的圆弧，半径为已知，显然，用半径编程最为方便。另外，程序中钻中心孔、钻孔使用了表达式计算坐标值的方法，如:

G00 X=20*COS（240）Y=SIN（240);

2）中心钻定位程序与φ6mm 钻头钻孔程序几乎一样，可以使用子程序方式编程。

3）各孔之间的坐标有对应的角度（0°、60°、120° 等)，可以通过以角度为变量的循环编程，以简化程序。

例 2：平面凸轮铣削

图 2-9 所示平面凸轮的材料为 45 钢，在 XK5032 立式铣床上加工，使用φ20mm 立铣刀。试进行数控铣削工艺分析及程序编制，铣周边轮廓。

1．工艺分析

凸轮曲线分别由几段圆弧组成，φ30mm 孔为设计基准，其余表面（包括φ13H7 孔）均已加工。取φ30mm 孔和一个端面作为主要定位面，在连接孔 4–φ13H7 的一个孔内增加削边销，在端面上用螺母垫圈压紧。因为孔是设计和定位的基准，所以，对刀点选在孔中心线与端面的交点上，这样很容易确定刀具中心与零件的相对位置。

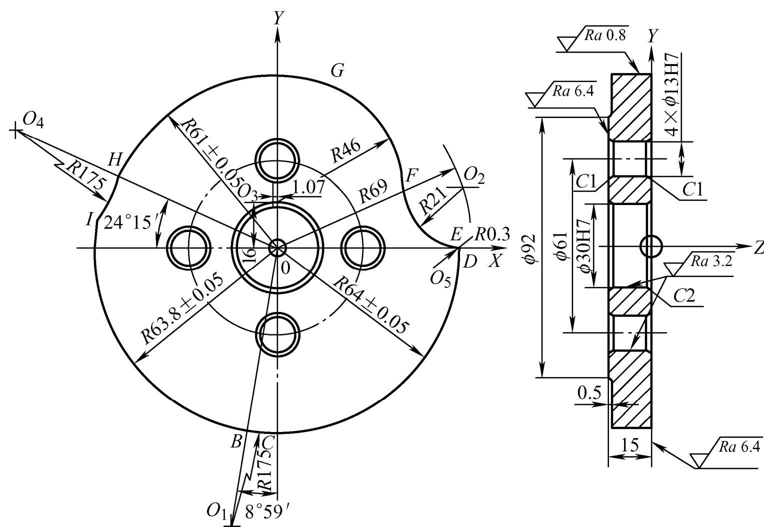


图 2-9　平面凸轮

2. 装夹方案

根据零件的结构特点，加工$\phi 20^{+0.021}_{0}$mm、$\phi 12^{+0.018}_{0}$mm 两个孔时，以底面 *A* 定位（必要时可设工艺孔），采用螺旋压板机构夹紧。加工凸轮槽内外轮廓时，采用“一面两孔”方式定位，即以底面 *A* 和$\phi 20^{+0.021}_{0}$mm、$\phi 12^{+0.018}_{0}$mm 两个孔为定位基准。

3. 加工调整

加工坐标系在 *X* 和 *Y* 方向上的位置设在工作台中间，在 G53 坐标系中取 *X*=−400，*Y*=−100。*Z* 坐标可以按刀具长度和夹具、零件高度决定，如选用ϕ20mm 的立铣刀，零件上端面为 *Z* 向坐标零点，该点在 G53 坐标系中的位置为 *Z*=−80 处，将上述三个数值设置到 G54 加工坐标系中。

4. 走刀路线的确定

走刀路线包括平面进给和深度进给两部分。平面进给时，外凸轮廓从切线方向切入，内凹轮廓从过渡圆弧切入。为使凸轮槽表面具有较好的表面质量，采用顺铣方式铣削。深度进给有两种方法：一种是在 *OXY* 平面（或 *OYZ* 平面）来回铣削逐渐进给到既定深度；另一种方法是先打一个工艺孔，然后从工艺孔进给到既定深度。

根据上面的数值计算，可画出平面凸轮走刀路线，如图 2-10 所示。

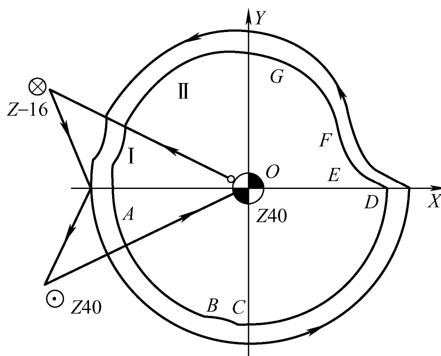


图 2-10　平面凸轮走刀路线

5. 数学处理

该凸轮的加工轮廓均由圆弧组成，因而只要计算出基点坐标，就可编制程序。在加工坐标系中，各点的坐标计算如下：

$\overset{\frown}{BC}$ 的中心 O_1 点 $\begin{cases} X=-（175+63.8）\sin（8°59'）=-37.28 \\ Y=-（175+63.8）\cos（8°59'）=-235.86 \end{cases}$

$\overset{\frown}{EF}$ 的中心 O_2 点

$\begin{cases} X^2+Y^2=692 \\ （X-64）^2+Y^2=212 \end{cases}$

解得 $X=65.75，Y=20.93$

$\overset{\frown}{HI}$ 的中心 O_4 点 $\begin{cases} X=-（175+61）\cos（24°15'）=-215.18 \\ Y=（175+61）\sin（24°15'）=96.93 \end{cases}$

$\overset{\frown}{DE}$ 的中心 O_5 点

$\begin{cases} X^2+Y^2=63.72 \\ （X-65.75）^2+（Y-20.93）^2=21.302 \end{cases}$

解得 $X=63，70，Y=-0.27$

B 点 $\begin{cases} X=-63.8\sin（8°59'）=-9.96 \\ Y=-63.8\cos（8°59'）=-63.02 \end{cases}$

C 点 $\begin{cases} X^2+Y^2=642 \\ （X+37.28）^2+（Y+235.86）^2=1752 \end{cases}$

解得 $X=-5.57，Y=-63.76$

D 点 $\begin{cases} （X-63.70）^2+（Y+0.27）^2=0.32 \\ X^2+Y^2=642 \end{cases}$

解得 $X=63.99，Y=-0.28$

E 点 $\begin{cases} （X-63.7）^2+（Y+0.27）^2=0.32 \\ （X-65.75）^2+（Y-20.93）^2=212 \end{cases}$

解得 $X=63.72，Y=0.03$

F 点 $\begin{cases} （X+1.07）^2+（Y-16）^2=462 \\ （X-65.75）^2+（Y-20.93）^2=212 \end{cases}$

解得 $X=44.79，Y=19.60$

G 点 $\begin{cases} （X+1.07）^2+（Y-16）^2=462 \\ X^2+Y^2=612 \end{cases}$

解得 $X=14.79，Y=59.18$

H 点 $\begin{cases} X=-61\cos（24°15'）=-55.62 \\ Y=61\sin（24°15'）=25.05 \end{cases}$

I 点 $\begin{cases} X^2+Y^2=63.802 \\ （X+215.18）^2+（Y-96.93）^2=1752 \end{cases}$

解得 $X=-63.02，Y=9.97$

6．编写加工程序

```
TULUN.MPF；                        程序名
N10 G54 X0 Y0 Z40；                进入加工坐标系
N20 G90 G00 G17 X-73.8 Y20；       由起刀点到加工开始点
```

N30 G00 Z0；	下刀至零件上表面
N40 G01 Z−16 F200；	下刀至零件下表面以下 1mm
N50 G42 X−63.8 Y10 F80 D01；	开始刀具半径补偿，D01 为刀具半径补偿号
N60 G01 X−63.8 Y0；	切入零件至 *A* 点
N70 G03 X−9.96 Y−63.02 CR=63.8；	切削 $\overset{\frown}{AB}$
N80 G02 X−5.57 Y−63.76 CR=175；	切削 $\overset{\frown}{BC}$
N90 G03 X63.99 Y−0.28 CR=64；	切削 $\overset{\frown}{CD}$
N100 G03 X63.72 Y0.03 CR=0.3；	切削 $\overset{\frown}{DE}$
N110 G02 X44.79 Y19.6 CR=21；	切削 $\overset{\frown}{EF}$
N120 G03 X14.79 Y59.18 CR=46；	切削 $\overset{\frown}{FG}$
N130 G03 X−55.26 Y25.05 CR=61；	切削 $\overset{\frown}{GH}$
N140 G02 X−63.02 Y9.97 CR=175；	切削 $\overset{\frown}{HI}$
N150 G03 X−63.80 Y0 CR=63.8；	切削 $\overset{\frown}{IA}$
N160 G01 X−63.80 Y−10；	切削零件
N170 G01 G40 X−73.8 Y−20；	取消刀具半径补偿
N180 G00 Z40；	*Z* 轴抬刀
N190 G00 X0 Y0；	返回加工坐标系原点
N195 M30；	程序结束

点　评

本题是用比较传统的方法直接计算出各点的坐标值编程的。因此计算坐标就成了本题的难点，需要解二元二次方程组，这对于多数数学基础差的读者来说感到不便，现在这个问题有两种解决方法，一是用 AUTOCAD 或 CAXA 等画图软件算点，但必须先把图重新画一遍（假定已有实物图样的话），也得熟悉画图软件！另一种方法就是直接用数学表达式编程，这在以后的例题中会看到，这是本书的一个重要特色。

2.4　CIP 圆弧插补

相关知识点

CIP 圆弧插补是指通过圆弧中间点（三点定圆）进行的圆弧插补。

编程格式：

CIP X_ Y_ Z_ I1=_ J1=_ K1=_；

编程时要注意以下面三点：

1）式中的 X、Y、Z 为第三点即终点坐标，I1、J1、K1 是第二点即中间点坐标。

2）I1、J1、K1 可以是绝对坐标，也可以是相对圆弧起点的增量坐标。

3）不需要用 G02/G03 说明圆弧方向，圆弧的起点、中间点、终点顺序已说明了刀具运动的方向。

三点构成一段圆弧，可用于圆弧逼近复杂曲线（或曲面），有时也采用描点法（如工件修复中的实测点）拟合出所需的光滑曲线，用直线逼近曲线一般没有圆弧逼近的精度高，

而圆弧编程通常用半径或 IJK 方式编程，就必须知道半径或圆心位置，描点法或实测点所得数据不具备这样的条件，因此无法直接用半径或 IJK 方式编写圆弧程序，用 CIP 方式编程就方便多了。

刀具运动的方向取决于圆弧起始点、中点、终点的顺序。如图 2-11 所示，圆弧从 *A* 点开始，经过中间点 *M* 到达终点 *B*，程序片段如下：

G00 X（圆弧起点 *X* 坐标）Y（圆弧起点 *Y* 坐标）;

CIP X22.268 Y45.597 I1=IC（−35.747） J1=IC（−12.95）;

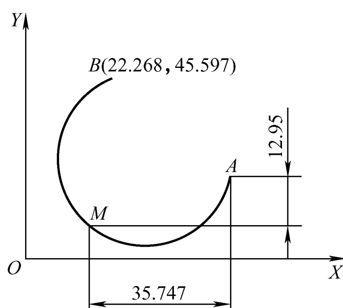


图 2-11 （CIP）中间点圆弧编程

例：平面“大头娃”零件轮廓的铣削

加工图 2-12 所示的平面“大头娃”零件，因零件的外形像一个“大头娃”而得名，工件的有效厚度为 25mm，各点坐标在图上已标出，内轮廓处（*E* 点）最小圆角半径按铣刀半径处理，轮廓表面粗糙度按 *Ra*12.5μm 加工，其余为不加工。试编写加工程序。

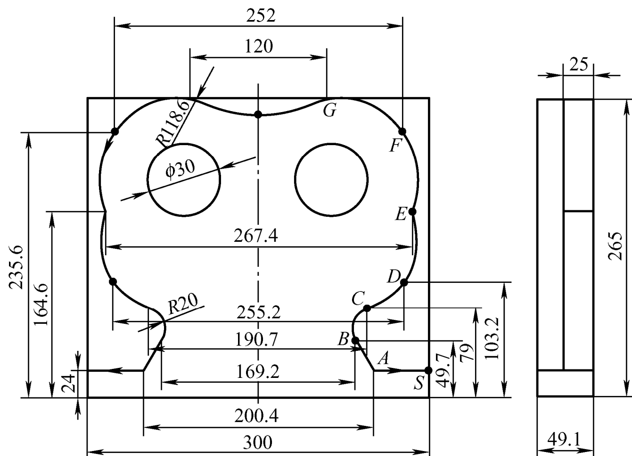


图 2-12 平面“大头娃”零件

1. 题意分析

从图上要求看出，“大头娃”零件的“面部”轮廓曲线分别由几段圆弧与直线组成，其中 *C*、*D*、*E* 三点构成一段圆弧，*E*、*F*、*G* 三点构成一段圆弧，按 IJK 方式或半径 R 方式编程都很困难，因为要计算 I、J、K 坐标值或半径 R。ϕ30mm 孔为设计基准，若直接采用“三点定圆”的方式编程就方便多了。

2. 装夹方案

根据零件的结构特点，加工“大头娃”零件轮廓时，以工件底面为定位基准（必要时可设工艺孔），采用螺旋压板机构夹紧。压板直接压在矩形的非加工部位。

3. 铣刀类型及参数的选择

铣刀应与工件表面形状与尺寸相适应。“大头娃”为平面轮廓零件，可采用立铣刀加工，选择铣刀参数时主要考虑零件加工部位的几何尺寸和刀具的刚性等因素。现选直径为ϕ12～

ϕ18mm 的立铣刀。如图 2-13 所示，图 2-13a 所示为玉米铣刀，图 2-13b 所示为螺旋齿立铣刀，图中的 L 为刀具全长，l 为切削刃长度（刃长），$L-l$ 为刀具有效长度。粗铣时，铣刀直径要小些，因为粗铣切削力大，选小直径铣刀可减小切削扭矩。精铣时，铣刀直径要大些，尽量包容工件整个加工宽度，以提高加工精度和效率，并减小相邻两次进给之间的接刀痕迹。

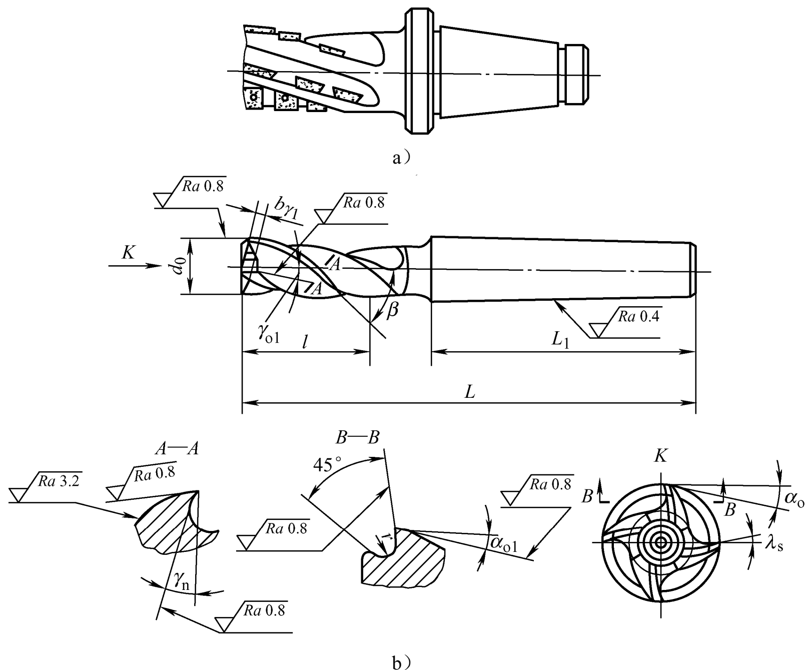


图 2-13　立铣刀

4. 程序编写

程序如下：

DATOUWA.MPF；	加工主程序
N05 G54 G90 G00 Z40；	建立加工坐标系
N10 T01 D01；	选取刀具（ϕ12mm 立式铣刀）
N15 G00 X180 Y24 M03 S500；	主轴起动，到达起刀点
N20 G01 Z−25 F100；	到达 Z 坐标起始点
N25 G01 G42 D02 X150 Y24；	建立刀补，到达 *S* 点并切入工件
N30 G01 X100.2；	走到 *A* 点
N35 X=169.2/2 Y49.7；	走到 *B* 点
N40 G02 X=190.7/2 Y79 CR=20；	走到 *C* 点，加工 *R*20mm 圆弧
N45 CIP X=267.4/2 Y164.6 I1=255.2/2 J1=103.2；	加工由 *C*、*D*、*E* 三点构成的圆弧
N50 CIP X=60 Y265 I1=252/2 J1=235.6；	加工由 *E*、*F*、*G* 三点构成的圆弧
N55 G02 X=−60 Y265 CR=118.6；	加工 *R*118.6mm 的圆弧
N60 CIP X=−267.4/2 Y164.6 I1=−252/2 J1=235.6；	走到 *E* 的对称点
N65 CIP X=−190.7/2 Y79 I1=−255.2/2 J1=103.2；	走到 *C* 的对称点

```
N70 G02 X=−169.2/2 Y49.7 CR=20；
                                              走到 B 的对称点
N75 G01 X−100.2；                             走到 A 的对称点
N80 G01 X−150 Y24；                           到达 S 的对称点
N85 G00 G40 X−180 Y24；                       到达出刀点，完成加工
N90 G00 Z40 M05；                             Z 坐标抬刀
N95 M30；                                     程序结束
```

点　评

大头娃的“面部”轮廓中出现不光滑的现象，可采用相邻三点重复拟合，若有必要的话，先精加工 *CDE*、*EFG*，再增加一次 *DEF* 段的光整加工，以进一步提高轮廓的光滑程度。

2.5　TURN 螺旋线插补

相关知识点

TURN 螺旋线插补指令（G02/G03，TURN 旋铣）

TURN 螺旋线插补指令简称旋铣，它可以加工螺纹，也可以加工非螺纹的圆柱孔、圆台，只要刀具的刃长大于每圈下降的深度，就不会形成螺纹，这样一边走圆弧，一边深度进给，完成铣削，因此也称为旋铣。TURN=螺旋圈数，螺旋圈数不一定是整圈数，当不足一圈时，TURN=0，可加工图 2-14 所示的轴承座内孔中的 M 型润滑油槽。图 2-15 所示螺旋线圈数就不是整圈数，其程序片段如下：



图 2-14　轴承座内孔中的 M 型润滑油槽

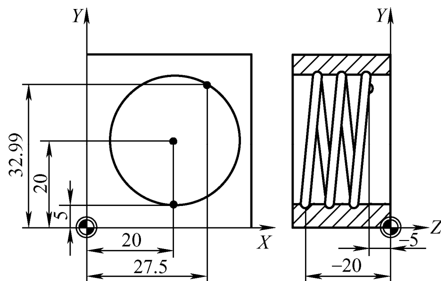


图 2-15　螺旋线应用举例

```
…
N10 G00 X27.5 Y32.99 Z5；                 刀具到达起始点
N15 G01 Z−5 F100 F80；                    刃长一定要大于每圈下降深度，否则会产生螺旋线
N20 G03 X20 Y5 Z−20 I=AC(20) J=AC(20) TURN=2；
…
```

由于圆弧编程有六种形式，故对应的 TURN 螺旋线插补也有六种形式，分别是：

1．圆心坐标（I，J，K）增量方式

G02/G03 X_ Y_ Z_ I_ J_ K_ TURN=_；

2. 半径（CR=）方式

G02/G03 X_ Y_ Z_ CR=_ TURN=_；

3. 圆心角（AR）+（I，J，K）增量方式

G02/G03 AR=_ I_ J_ K_ TURN=_；

4. 圆心角（AR）+（X，Y，Z）终点方式

G02/G03 AR=_ X_ Y_ Z_ TURN=_；

5. 极坐标方式

G02/G03 AP=_ RP=_ TURN=_；

6. 三点圆弧编程（CIP）方式

CIP X_ Y_ Z_ I1=_ J1=_ K1=_ TURN=_；

例：漏斗孔的加工

图 2-16 所示是一个 340.5mm×340.5mm×57.92mm 的方形工件，外形已加工到尺寸，上面要加工一个漏斗孔，漏斗孔是由半径不同、深度不同共十层圆台构成的，每个圆台从上到下由ϕ300mm 到ϕ100mm 依次递减 20mm，深度均为 5mm，形状像漏斗。试分析加工工艺并编写数控程序。

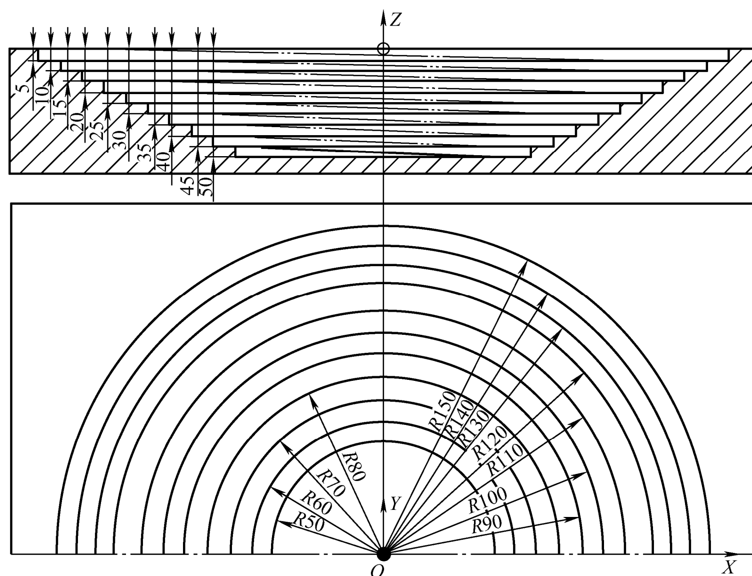


图 2-16 漏斗孔的加工

1. 零件的加工工艺分析

漏斗形零件的加工，尺寸精度与表面粗糙度要求不高，主要考虑下刀方便、加工过程连续、排屑顺畅，并适当考虑加工效率等问题，选定在数控铣床上加工，且在上道工序中已把工件的外形加工到尺寸，已有了找正基准，找正装夹就很方便了。

2. 程序分析

按螺旋线方式加工漏斗孔，其工作原理是：刀具在 *OXY* 平面上完成圆弧插补的同时，*Z* 轴也同时进给，这样刀具就不是垂直下刀，而是按螺旋线 TURN 方式，一边圆弧进给，一边

下刀，加工过程连续进行，效率也很高。由于是螺旋线插补方式，刀具主轴高速旋转，相当于刀具自转，刀具圆弧插补相当于刀具公转，由于刀具自转速度高，又有公转配合，形成旋风，非常有利于排屑，再辅以高压风冷，排屑十分顺畅。

3. 刀具选择

由于是“旋铣”，即一边铣削，一边轴向下刀形成螺旋线进给轨迹，不用垂直下刀，省去了预钻孔工序；也不用键槽铣刀，而是选用加工效率更高的硬质合金螺旋齿立铣刀或三面刃刀盘加工。

4. 程序编制

程序如下：

```
XUANXI1.MPF;                                    正常编程
N05 G54 G17 G90 Z100;
N10 G00 X150 Y0;                                刀具到达第一个台阶起点
N15 G01 Z1 F100 F80;                            下刀，刀具刃长要大于每圈下降的深度
N20 G03 X150 Y0 Z−5 I=AC(0)J=AC(0) TURN=2;
                                                AC( )为绝对坐标
N25 G01 X140 F100;                              刀具到达第二个台阶起点
N30 G03 X140 Y0 Z=IC (−5) I=AC(0) J=AC(0) TURN=2;
                                                IC( )为增量坐标
N35 G01 X130;                                   刀具到达第三个台阶起点
N40 G03 X130 Y0 Z=IC (−5) I=AC(0) J=AC(0) TURN=2;
N45 G01 X120;                                   刀具到达第四个台阶起点
N50 G03 X120 Y0 Z=IC (−5) I=AC(0) J=AC(0) TURN=2;
N55 G01 X110;                                   刀具到达第五个台阶起点
N60 G03 X110 Y0 Z=IC (−5) I=AC(0) J=AC(0) TURN=2;
N65 G01 X100;                                   刀具到达第六个台阶起点
N70 G03 X100 Y0 Z=IC (−5) I=AC(0) J=AC(0) TURN=2;
N75 G01 X90;                                    刀具到达第七个台阶起点
N80 G03 X90 Y0 Z=IC (−5) I=AC(0) J=AC(0) TURN=2;
N85 G01 X80;                                    刀具到达第八个台阶起点
N90 G03 X80 Y0 Z=IC (−5) I=AC(0) J=AC(0) TURN=2;
N95 G01 X70;                                    刀具到达第九个台阶起点
N100 G03 X70 Y0 Z=IC (−5) I=AC(0) J=AC(0) TURN=2;
N105 G01 X60;                                   刀具到达第十个台阶起点
N110 G03 X60 Y0 Z=IC (−5) I=AC(0) J=AC(0) TURN=2;
N115 G01 X50;                                   刀具到达第三个台阶起点
N120 G03 X50 Y0 Z=IC (−5) I=AC(0) J=AC(0) TURN=2;
N125 G00 Z50;
N130 M30;                                       程序结束。
```

本程序也可用循环编程，达到简化程序的目的。

```
XUANXI2.MPF;                                    循环编程
N05 G54 G17 G90 Z100;
N10 R01=150 R02=1;
N15 G01 Z0 F100 F80;                            下刀，刀具刃长要大于每圈下降的深度
N20 KK：G01 X=R01 Y0;                           刀具到达第一个台阶起点
N25 G03 X=R01 Y0 Z=−5*R02 I=AC(0) J=AC (0) TURN=2;
N30 R01=R01−10 R02=R02+1;                       每加工一层，R01 减 10，R02 计数一次
N35 IF R02<=11 GOTOB KK;                        当加工层数小于或等于 11 时，进行循环
```

```
N40 G00 Z50;
N45 M30;                                  程序结束
```

点 评

TURN 螺旋线插补方式，是一边圆弧进给，一边下刀，加工过程连续进行，效率也很高。由于是螺旋线插补方式，刀具主轴高速旋转，相当于刀具自转，刀具圆弧插补相当于刀具公转，由于刀具自转速度高，又有公转配合，形成旋风，非常有利于排屑，再辅以高压风冷，排屑十分顺畅。

2.6　带刀具补偿编程

相关知识点

刀具补偿（简称刀补）包括刀具长度补偿和刀具半径补偿。这些功能可以补偿刀具磨损以及换刀时对准正确位置、简化编程。用刀具上的某一点来代表刀具所在的位置，这一点称为刀具位置点，简称“刀位点”，如图 2-17 所示。对于车刀，刀位点就是刀尖圆弧中心，对于面铣刀、立铣刀和钻头等回转类刀具来说，是指它们的底面中心；数控机床在实际加工过程中是通过控制刀位点，即刀具中心轨迹来实现切削加工任务的。

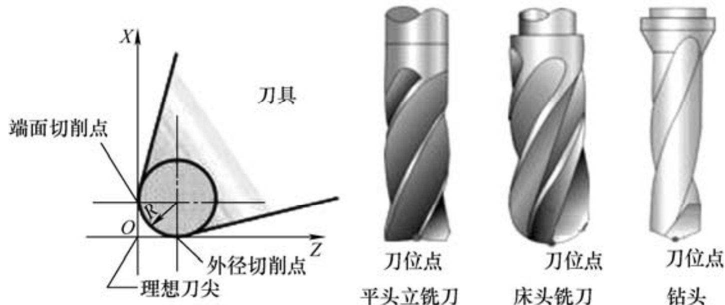


图 2-17　刀位点

补偿分为刀具补偿的建立、执行与撤销三个阶段。

G41——左偏刀具半径补偿：假设工件不动，沿着刀具运动方向向前看，刀具位于工件左侧的刀具半径补偿。

G42——右偏刀具半径补偿：假设工件不动，沿着刀具运动方向向前看，刀具位于工件右侧的刀具半径补偿，如图 2-18 所示。

G40——刀具半径补偿撤销：使用该指令后，G41、G42 指令无效。

G43——刀具长度正补偿。

G44——刀具长度负补偿。

G41、G42、G40 指令需在 G01 或 G00 指令状态下，通过直线运动建立或取消。X（U）、Z（W）为建立或取消刀补段中刀具移动的终点坐标。刀具半径补偿应当在切削进程起动之前完成，同样，要在切削进程之后取消。G41、G42、G40 均为模态指令。

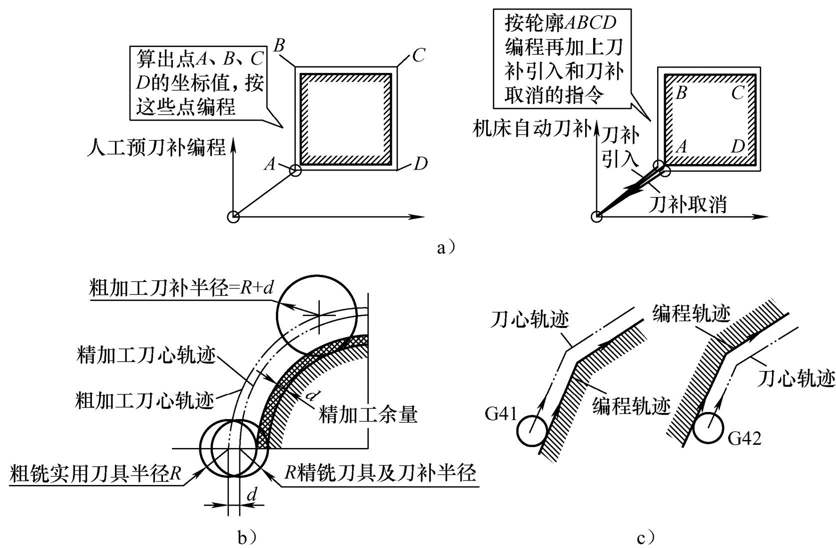


图 2-18　刀具补偿

例 1：鱼形零件的加工

如图 2-19 所示，因零件的外形像一条“鱼”，故称为“鱼”形件。应用刀具半径与长度补偿功能，编写加工一条鱼的外形程序。

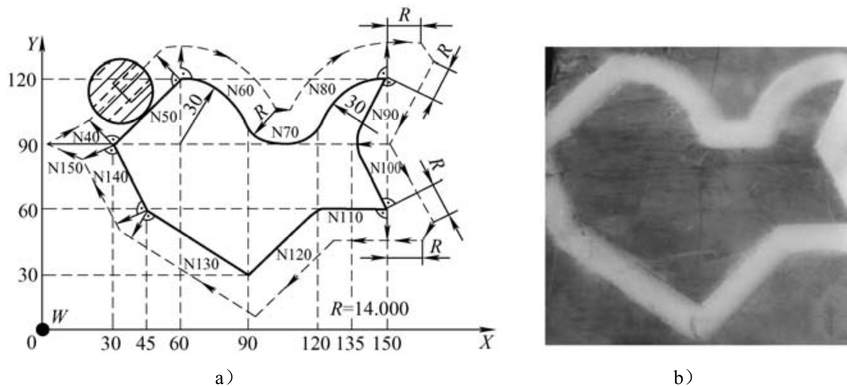


图 2-19　鱼形零件

程序编制如下：

JIAGONGYU.MPF；　　加工“鱼”形件主程序名
N05 G00 G54 G90 X0 Y90 Z20 G43 D01；
　　起刀位置，建立长度补偿
N10 Z−25 S300 M03 F100；　　下刀，给定切削用量
N15 G01 G41 D02 X30 Y90；　　建立刀补，现为左补，并切入工件
N20 X60 Y120；　　按进给方式走直线到（X60，Y120）的位置
N25 G02 X90 Y90 CR=30；　　按进给方式走顺圆到（X90，Y90）的位置
N30 G01 X120；　　按进给方式走直线到（X120，Y90）的位置
N35 G02 X150 Y120 CR=30；　　按进给方式走顺圆到（X150，Y120）的位置
N40 G01 X135 Y90；　　按进给方式走直线到（X135，Y90）的位置
N45 X150 Y60；　　按进给方式走直线到（X150，Y60）的位置
N50 X120；　　按进给方式走直线到（X120，Y60）的位置

N55 X90 Y30；	按进给方式走直线到（X90，Y30）的位置
N60 X45 Y60；	按进给方式走直线到（X45，Y60）的位置
N65 X30 Y90；	按进给方式走直线到（X30，Y90）的位置
N70 G40 X0 M05；	回到起刀位置，取消刀补，主轴停止
N160 G00 Z20；	抬刀，回到初始状态
N165 M30；	程序结束

在使用刀补时要注意以下几个问题：

1）在运动中才能建立刀补，且只能是直线运动，不能是圆弧运动，运动的距离至少要大于刀具半径，如图 2-20 所示。对于外轮廓这一般没什么问题，但对于内轮廓，往往受到空间的限制而无法建立刀补，这时只能用其他方法了（在以后的例子中将会见到）。

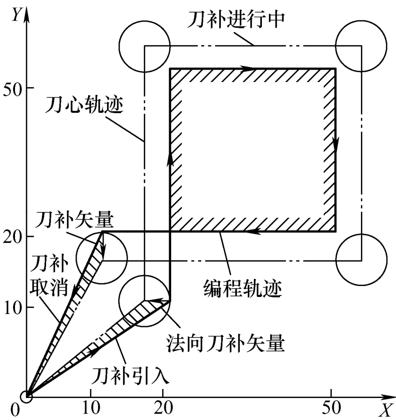


图 2-20　刀具补偿的建立与取消

2）G40 可同时取消刀具半径与长度补偿，但一般先取消刀具半径补偿后取消长度补偿，因为同时取消时会发生碰撞，非常危险！D00 只取消刀具半径补偿。

3）特别要注意在不同加工平面刀补的方向判断。在落地数控镗床或龙门铣床上，当使用了角度铣头后，要沿着不在圆弧平面内的坐标轴，由正方向向负方向看去（视角方向：刀具轴的负向），沿着刀具运动方向向前看（假设工件不动），根据刀具位于工件的哪一侧来判断刀补。

4）请注意观察鱼尾处刀具中心轨迹，发现直线与圆相交、直线与直线相交刀具的补偿方式有所不同，其他的补偿方式具体见表 2-3～表 2-5。

表 2-3　刀具补偿方式一

	G450：TRC　用圆弧过渡转折		
	内轮廓：$\alpha \geq 180°$	外轮廓：$90° \leq \alpha < 180°$	外轮廓：$\alpha < 90°$
直线/直线	N10 N15 α R G42 $S_{(N10)}$	N10 N15 α R G42 $S_{(N10)}$ $S_{(N15)}$	$S_{(N10)}$ G42 N10 α R N15 $S_{(N15)}$
直线/圆弧	N10 α R N15 G42 $S_{(N10)}$ R	N10 α R G42 $S_{(N10)}$ N15 $S_{(N15)}$	$S_{(N10)}$ G42 N10 α R N15 $S_{(N15)}$

（续）

	G450：TRC　用圆弧过渡转折		
	内轮廓：$\alpha \geqslant 180°$	外轮廓：$90° \leqslant \alpha < 180°$	外轮廓：$\alpha < 90°$
圆弧/直线			
圆弧/圆弧			

表 2-4　刀具补偿方式二

	G451：TRC　用直线相交过渡转折		
	内轮廓：$\alpha \geqslant 180°$	外轮廓：$90° \leqslant \alpha < 180°$	外轮廓：$\alpha < 90°$
直线/直线			
直线/圆弧			
圆弧/直线			

（续）

	G451：TRC 用直线相交过渡转折		
	内轮廓：$\alpha \geqslant 180°$	外轮廓：$90° \leqslant \alpha < 180°$	外轮廓：$\alpha < 90°$
圆弧/圆弧			

表 2-5　刀具补偿方式三

轨迹类型	在选用 G42 之处：$90° \leqslant \alpha \leqslant 180°$		
	G455：补偿轨迹趋近		G456：正常直接趋近
	G450：TRC 带过渡圆弧过渡	G451：TRC 带直线交点过渡	
直线/直线			
直线/圆弧			
轨迹类型	在选用 G42 之处：$\alpha \leqslant 90°$		
	G455：补偿轨迹趋近		G456：正常直接趋近
	G450：TRC 带过渡圆弧过渡	G451：TRC 带直线交点过渡	
直线/直线			

（续）

轨迹类型	在选用 G42 之处：$\alpha \leqslant 90°$		
	G455：补偿轨迹趋近		G456：正常直接趋近
	G450：TRC 带过渡圆弧过渡	G451：TRC 带直线交点过渡	
直线/圆弧			

例 2：模板的加工

图 2-21 所示工件为压力机下的模板，已知毛坯尺寸为 150mm×85mm×50mm，六面为已加工表面，材料为 45 钢，要求在配有 SINUMERILK 840D 系统的数控铣床上进行加工。试分析加工工艺并编写加工程序，程序中要求使用刀具补偿功能。

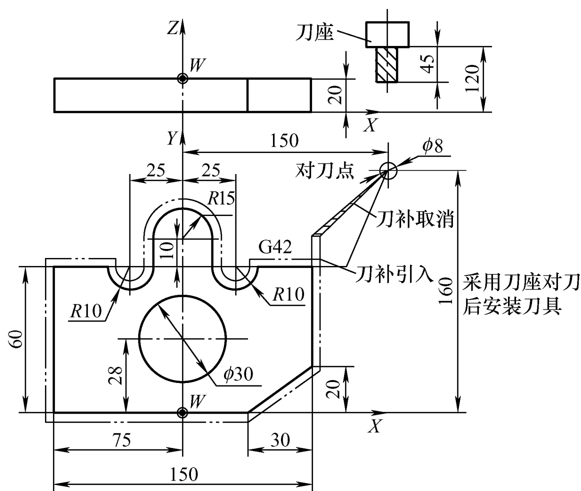


图 2-21　压力机下的模板

1. 工艺分析

因为毛坯的六个表面是已加工面，且 150mm×85mm×50mm 毛坯尺寸不大，又经过粗加工，正好适用机用虎钳装夹，可选用精度较高的“机用虎钳”装夹工件，先找正机用虎钳的位置，并用压板把机用虎钳固定的机床工作台上的合适位置，再装夹工件。

工件加工的厚度为 20mm，为了方便装卡及加工，工件必须露出钳口 28mm 以上，在装夹过程中，应对工件进行找正。找正时，将百分表用磁性表座固定在主轴上，百分表触头接触工件，按已加工表面“打表”找正，在前后或左右方向移动主轴，找正工件上下平面与工作台的平行度；同样在侧平面内移动主轴，找正工件侧面与轴向进给方向的平行度。如果不平行，则可用铜棒轻敲工件或用添加垫片的办法纠正，然后再重新找正，误差应小于 0.02mm。

2. 程序编制

选择工件上表面对称中心作为编程原点，其加工程序如下：

```
XY001.MPF;
N05 G54 G90 G00 X225 Y160 Z50;
N10 M03 S100 F100;
N15 G01 X150 Y60 Z-20;
N20 G42 D02 X110 Y60;                建立刀具半径补偿
N25 X35;                             加工右上直边
N30 G111 X25 Y60;                    设定极坐标中心点（简称极心）
N35 G02 AP=180 RP=10;                应用极坐标编写圆弧程序
N40 G01 X15 Y70;
N45 G111 X0 Y70;                     设定极心
N50 G03 AP=180 RP=15;                加工 R15mm 的半圆
N55 G01 X15 Y60;
N60 G111 X-25 Y60;                   设定极心（见下节）
N65 G02 AP=180 RP=10;
N70 G01 X-75 Y60;
N75 G01 X-75 Y0;
N80 G01 X45 Y0;
N85 G01 X75 Y20;
N90 G01 X75 Y60;
N95 G00 D00 150 Y160;                D00 取消刀具补偿
N100 Z50 M05;
N105 G41 D00;
N110 M02;
```

本例采用刀具补偿功能，刀具中心实际走的轨迹是图 2-22 中所示的点画线，分刀具的引入与取消两个阶段。对于外轮廓零件的加工，建立刀具补偿，可采用“延长线”方式，对于内轮廓加工，由于受到零件内部几何空间的限制，就不能直接采用“延长线”方式，只能用圆弧切入切出方式。如图 2-22a 所示，3 点到 4 点完成刀具补偿，4 点到 5 点圆弧切入，5 点到 9 点圆弧切出，9 点到 3 点取消刀具补偿。还可以直接用 R 参数方式计算出刀具中心坐标，直接编程，如图 2-22b 所示。

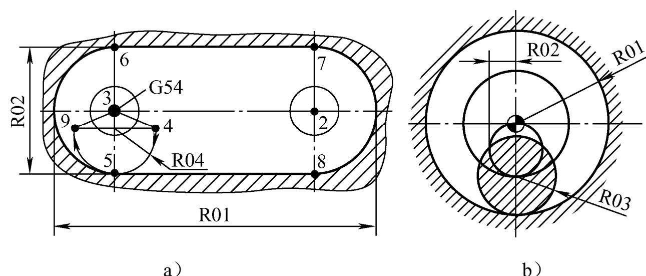


图 2-22　内轮廓刀具半径的建立

G41、G42——刀具半径补偿。判断补偿方向时要注意两点：

1）视角方向与刀具轴的负方向一致。

2）沿着刀具运动方向向前看（假设工件不动），刀具位于工件左侧时为左补偿，刀具位于工件右侧时为右补偿。

G40——刀具半径补偿撤销。使用该指令后，G41、G42 指令无效。

D——刀具补偿的偏置号，刀具补偿的偏置量不用 D00，D00 只取消刀具半径补偿；G40 同时取消刀具半径与长度补偿。

另外，为了提高表面质量，降低表面粗糙度 *Ra* 值，在实际加工过程中，影响零件表面质量的因素很多，常见的影响因素主要有表 2-6 中所列的几个方面。

表 2-6　影响零件表面质量的主要因素

影响因素	序号	产生原因
工件装夹与找正	1	工件装夹不牢固，加工过程中产生振动
刀具	2	刀具磨损后没有及时修磨
	3	刀具刚性差，刀具加工过程中产生振动
	4	主偏角、副偏角及刀尖圆弧半径选择不当
加工工艺	5	进给量选择过大，残留面积高度增高
	6	切削速度选择不合理，产生积屑瘤
	7	背吃刀量（精加工余量）选择过大或过小
	8	*Z* 向分层切深后没有进行精加工，留有接刀痕迹
	9	切削液选择不当或使用不当
	10	加工过程中刀具停顿
	11	工件材料热处理不当或热处理工艺安排不合理
	12	采用不适当的进给路线，精加工采用逆铣

2.7　极坐标编程

相关知识点

一般情况下编写零件程序时使用直角坐标系，但有时工件上的点用极坐标定义更直接，可以避免数学计算。

采用极坐标编程需要确定三个要素：极点、极半径、极坐标角度。极点可以在直角坐标系或极坐标系中定义；极半径是指目标点到极点的距离；极坐标角度是指与所在平面中的第一坐标轴（如 *OXY* 平面、*OYZ* 平面、*OZX* 平面前一个轴为第一坐标轴）之间的夹角（比如 G17 中 *X* 轴），该角度可以是正、负角。极半径和极坐标角度这两个值会一直保存，只有当极点发生变化或平面更改后才需重新编程。

如图 2-23 所示，*A* 点为极点，目标点 *B* 到极点 *A* 的距离称为极半径 RP，直线 *AB* 与水平坐标轴之间的夹角称为极坐标角度 AP。

定义极点有两种方式：一种是用直角坐标系确定，另一种是用极角和极半径确定，如图 2-24 所示，功能说明参见表 2-7，编程格式如下：

G110/G111/G112 X__ Y__ Z__；
G110/G111/G112 AP=__ RP=__；

利用极坐标进行运动编程：

G00 AP=__ RP=__；
G01 AP=__ RP=__；
G02 AP=__ RP=__；
G03 AP=__ RP=__；

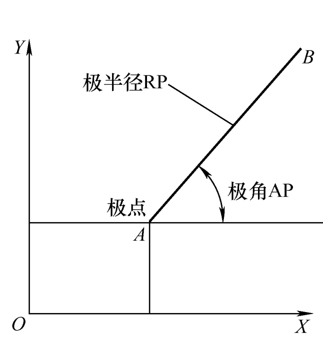


图 2-23　极坐标编程三要素

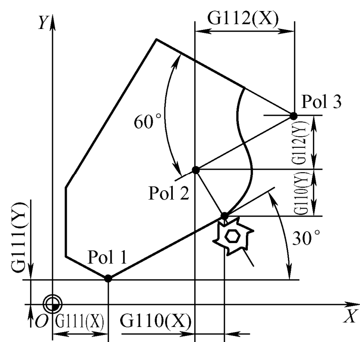


图 2-24　极坐标编程

表 2-7　极点定义的命令及其说明

命　　令	说　　明
G110	相对上一个“到达点”的增量坐标点为极心
G111	以工件坐标系中的绝对坐标点为极心
G112	相对上一个“极心”的增量坐标点为极心
AP	极角：以第一编程轴的正向为始边，极半径为终边，逆时针方向为正角
RP	极半径：极半径是指目标点至极心的距离，无正负号；

SINUMERIK 840D 中的极坐标中的极心、极半径、极角是确定点位的三要素，缺一不可。G110、G111、G112 只用于确定极坐标位置，本身不产生运动，要运动还必须有 G 指令。它不同于 SINUMERIK 840C 的极坐标编程，SINUMERIK 840C 的极坐标编程指令具有定位与运动的功能，其指令是：

G10：极坐标中的快速移动（相当于 G00）。

G11：极坐标中的直线插补（相当于 G01）。

G12：极坐标中的顺圆插补（相当于 G02）。

G13：极坐标中的逆圆插补（相当于 G03）。

如图 2-25 所示，SINUMERIK 840C 的极坐标用 U 表示半径，极角用字母 A 表示，并用极坐标方式编写图 2-26 所示的圆弧槽程序如下：

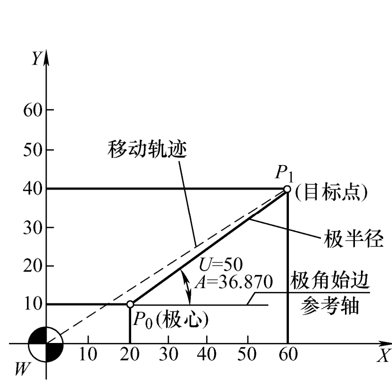


图 2-25　SINUMERIK 840C 极坐标

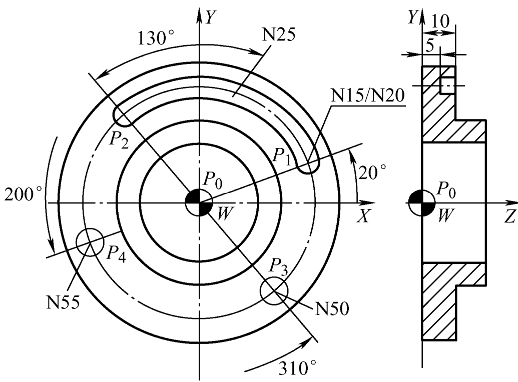


图 2-26　铣削圆弧槽

```
…
N05 G90 G00 X200 Y300 Z150;            起刀点
N10 G90 G10 X0 Y0 U50 A20;             极心（0，0），极半径为 50mm，极角为 20°
N15 G00 Z15;                           刀具从 P1 点的上方快速接近工件
N20 G01 Z5 F800 S800 M03;              下刀
N25 G13 X0 Y0 U50 A130;                极坐标走逆圆弧到达 P2 点，产生进给运动
N30 G00 Z100;                          抬刀
N35 X100 Y100 M05;                     主轴停止，走到工件外面
N40 T02 M06;                           换 T02 钻头
N45 Z220 S800 M03;
N50 R02=5 R03=20;                      给定位钻孔参数
N55 G81 G10 X0 Y0 U50 A310;            钻 P3 孔，极角也可以用 A50
N60 G12 X0 Y0 U50 A200;                按顺圆弧轨迹快速进给到 P4 点，再钻孔
N65 G80 G00 Z100;                      G80 取消钻孔循环，抬刀
…
```

例 1：钻模板的加工

图 2-27 所示的钻模板上各孔的钻、扩均采用同样的子程序 KONG.SPF 加工，试编写钻模板的加工主程序。

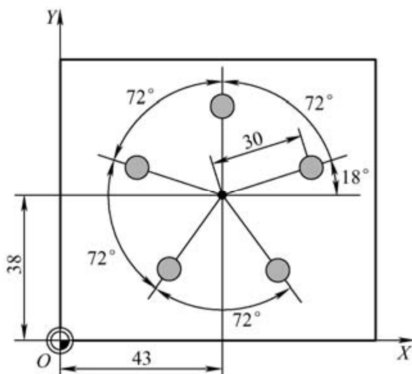


图2-27　用极坐标编写圆周孔加工程序

程序如下：

```
ZHUAN.MPF;
N10 G17 G54 X0 Y0 Z30;         初始化
N20 G111 X43 Y38;              设定极心位置
N30 G00 RP=30 AP=18 Z5;        走到第一个孔
N25 M03 S700 F50;
N40 KONG;                      调用钻孔子程序
N50 G91 AP=72;                 G91 增量坐标，极角增加 72°，G91 是模态的
N60 KONG;                      调用钻孔子程序
N70 AP=IC (72);                用 IC 增量方式，极角增加 72°，IC 是非模态的
N80 KONG;                      调用钻孔子程序
N90 AP=IC (72);
N100 KONG;
N110 AP=IC (72);
N120 KONG;
N130 M30;

KONG.SPF;                      钻孔子程序
N05 G01 Z-45;                  钻孔深度为 45mm
N10 G04 X0.5;                  G04 孔底暂停 0.5s
N15 G00 Z5;                    抬刀
N20 RET;                       子程序结束，并返回到主程序调用处
```

例 2：蝙蝠形零件的编程

图 2-28 所示的蝙蝠形零件，其外轮廓的加工应用极坐标与直角坐标方式编程，*O* 点为工件原点，左右两边对称，*Z* 向切深为 5mm（上表面为 *Z*0），加工起点为 *ST* 点，进给路线为 *ST*→*a*→*b*→*c*→...*a*→*ST*，刀具选 T1，直径为 10mm。

方法一：极坐标方式编程

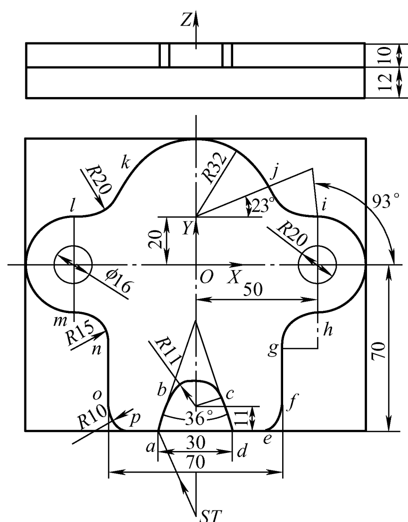


图 2-28　蝙蝠形零件外轮廓

```
JIZUOBIAO1.MPF;
N05 G54 G90 G00 Z20;
N10 X0 Y−105 S800 M03;          走到起刀位置
N15 G01 Z−10;                   下刀
N20 G42 D02 X−15 Y0;            走到a点并完成刀补
N25 G111 X0 Y−59;               极心坐标
N30 G01 PR=11 AP=162;           走到b点
N35 G02 AP=18;                  走到c点
N40 G01 X15 Y−70;               走到d点
N45 X25;
N50 G03 X35 Y−60 CR=10;
N55 G01 Y−35;
N60 G02 X50 Y−20 CR=15;
N65 G111 X50 Y0;                极心坐标
N70 G03 AP=93 RP=20;            走到i点
N75 G111 X0 Y20;                定极心位置
N80 G02 AP=23 RP=20;            走到j点
N85 G03 AR=180−23 RP=32;
N90 G111 X−50 Y0;               定极心位置
N95 G02 AP=180−93 RP=20;
N100 G03 AP=270 RP=20;
N105 G02 X35 Y−35 CR=15;
N110 G01 Y−60;
N115 G03 X25 Y−70 CR=10;
N120 G01 X0;
N125 D00 Y−105;                 回到起刀点并取消刀补
N130 G00 Z30 M05;
N135 M30;
```

方法二：直角坐标方式编程

```
JIZUOBIAO2.MPF
N05 G54 G00 G90 X0 Y−100;
N10 Z−10;
N15 M03 S700 F400;
N20 G42 G64 G01 X−15 Y−70;
N25 G01 X=−11*COS(18) Y=− (−70−11−11*SIN(18));
                                数学表达式直接编程
N30 G02 X=11*COS(18) Y=− (−70−11−11*SIN(18)) CR=11;
                                数学表达式直接编程
N35 G01 X15 Y−70;
N40 X20;
N45 G03 X35 Y−60 CR=10;
N50 G01 Y−35;
N55 G02 X50 Y−20 CR=15;
N60 G03 X=50−20*SIN(3) Y=20*COS(3) CR=−20;
                                走圆弧到i点，圆心角为183°
N65 G02 X=32*COS(23) Y=20+32*SIN(23) CR=20;
N70 G03 X=−32*COS(23) Y=20+32*SIN(23) CR=32;
N75 G02 X=− (50−20*SIN(3)) Y=20*COS(3) CR=20;
```

```
N80 G03 X−50 Y−20 CR=−20;
N85 G02 X−35 Y−35 CR=15;
N90 G01 Y−60;
N95 G03 X−25 Y−70 CR=10;
N100 G01 X−15;
N105 G01 X0;
N110 G00 Z50;
N115 G40 X0 Y−100;
N120 M30;
```

例 3：三角板的数控加工

如图 2-29 所示，加工零件外轮廓，O 点为工件原点，左右两边对称，Z 向切深为 5mm（上表面为 $Z0$），加工起点为 S 点，进给路线为 $S \to P_1 \to O \to A \to B \to C \to D \to E \to F \to O \to P_2$，刀具 T1 直径为 10mm。

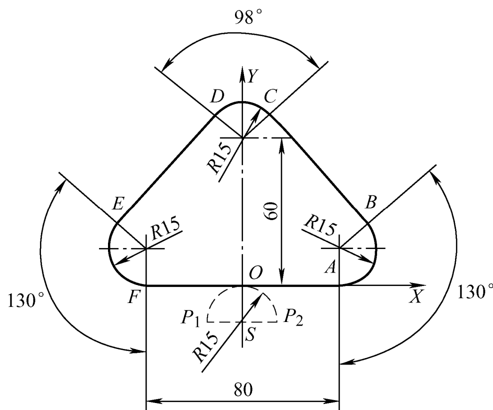


图 2-29　三角板

1. 各点极角计算

B 点的极角：130° −90° =40°

C 点的极角：90° −98° /2=41°

D 点的极角：98° +41° =139°

E 点的极角：180° −40° =140°

F 点的极角：270° ，也可以用−90°

2. 程序编制

用极坐标编制三角板程序如下：

```
SANJIAO.MPF;
N05 G54 G90 G00 Z0;            确定坐标零点
N10 M06 T01;                   换φ20mm 的立铣刀
N15 X0 Y−15 S800 M03;          走到起刀点
N20 G01 Z−5 M08 F100;          下刀
N25 G42 D01 X−15;              建立刀补
N30 G02 X0 Y0 CR=15;           圆弧切入
N35 G01 X40;                   铣下底边
N40 G111 X40 Y15;              定极心坐标
N45 G03 AP=130−90 RP=15;       铣 R15mm 圆角，到达 B 点
N50 G111 X0 Y60;               定下一个极心坐标，即 C 点的极心
N55 G01 AP=90−98/2 RP=15;      按极坐标方式，AP=41° ，走直线到 C 点
N60 G03 AP=139;                按极坐标方式，走圆弧到 D 点
N65 G111 X−40 Y15;             定下一个极心坐标
N70 G01 AP=140;                按极坐标方式，走直线到 E 点
N75 G03 AP=270;                按极坐标方式，走圆弧到 F 点
N80 G01 X0;                    铣下底边
N85 G02 X15 Y−15 CR=15;        圆弧切出
N90 G00 G40 X0 Y−15;           取消刀补
N95 G00 G90 Z40;               抬刀
N100 M30;                      程序结束
```

点　评

本例的关键是“极坐标系”中极角的计算，根据“极角是以第一编程坐标轴的正向为始边，极半径为终边，逆时针方向为正角”的规定，如 *C* 点的极心为（X0 Y60），极角 AP=90−98/2=41°，极半径 RP=15。

2.8　架构式（FRAME）坐标变换编程

案例引入

在许多零件上往往有若干个大小、形状完全相同或者形状相似的几何图形。图 2-30 所示零件上有两个大小不等的菱形、三个大小不等的正方形（特殊菱形），可以先编写出其中一个几何图形在坐标原点位置加工的子程序，即原始子程序，再通过坐标变换，即坐标的平移 TRANS、旋转 ROT、比例缩放 SCALE 和镜像功能 MIRROR 等功能，完成其他几何图形的加工，达到事半功倍的效果。

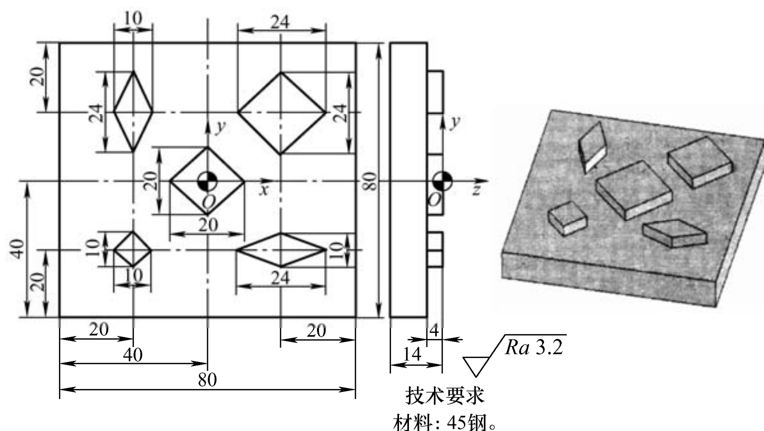


图 2-30　由相同或者相似几何图形构成的零件

相关知识点

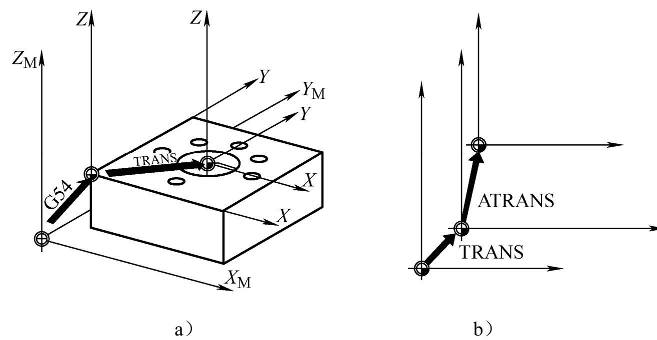
1．坐标平移

（1）编程格式

TRANS X_Y_Z_；　　绝对坐标平移，参考原始坐标的平移量，如图 2-31a 所示。

ATRANS X_Y_Z_；　　相对坐标平移，参考上一个坐标的平移量，如图 2-31b 所示。

（2）程序示例　如图 2-32 所示，加工 4 个形状完全相同而位置不同的凸台。将加工形状以一个子程序存储在数控系统中，原始子程序名为 KUAI，则主程序调用格式如下：



a）　　b）

图 2-31　坐标系平移

a）绝对坐标系平移　b）相对坐标平移

…	
N20 G00 X0 Y0；	刀具到达起始点
N30 TRANS X10 Y6；	绝对平移
N40 KUAI；	调用原始子程序 KUAI 加工工件 1
N60 TRANS X50 Y6；	绝对平移
N70 KUAI；	调用原始子程序 KUAI 加工工件 1
N80 TRANS X50 Y30；	绝对平移
N90 KUAI；	调用原始子程序 KUAI 加工工件 1
N100 TRANS X10 Y30；	绝对平移
N110 KUAI；	加工工件 4
…	

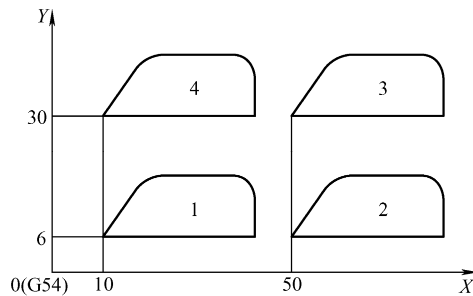


图 2-32　坐标系平移举例

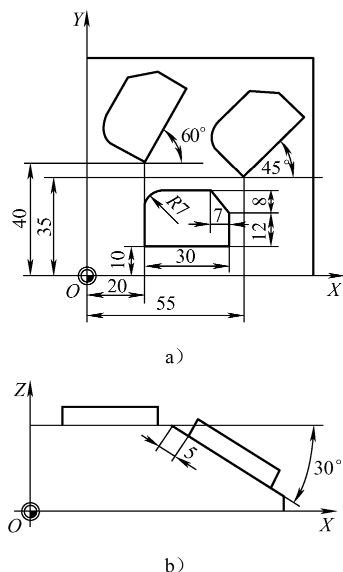
如果采用 ATRANS 指令，则 N60 到 N110 可以改写为如下格式：

N60 ATRANS X40 Y0；	增量平移
N70 KUAI；	加工工件 2
N80 ATRANS X0 Y24；	增量平移
N90 KUAI；	加工工件 3
N100 ATRANS X−40 Y0；	增量平移
N110 KUAI；	加工工件 4

2. 坐标旋转

坐标旋转分两种情况，一是加工平面（刀具轴）不变，工件在当前工作平面围绕刀具轴旋转一定角度，即平面旋转（图 2-33a），坐标旋转用“RPL=角度参数”编程；二是工件表面与某一个坐标轴成一夹角，形成空间旋转（图 2-33b），这时的加工平面或刀具轴发生变化，这种情况下，机床必须带有角度铣头（图 2-33c）以改变刀具轴线才能完成加工，其旋转指

令为 ROT 或 AROT。





c）

图 2-33　坐标系平移举例

3. 比例缩放

通过比例缩放指令可以使一个形状的尺寸按照一定的规则变化。可以用此指令编制相似形状、不同尺寸的零件的加工程序，*X*、*Y*、*Z* 值表示缩放比例，当 *X*、*Y*、*Z* 的值相同时，称为同比例缩放，图形完全相似，如图 2-34a 所示。当 *X*、*Y*、*Z* 的值不同时，称为不同比例缩放，图形部分相似甚至完全不相似，图 2-34b 所示。TU1 为原始图形，TU2 是原始图形同比例缩小 1/2，图形完全相似，TU3 是原始图形不同比例缩放（*X* 方向缩小 2/3，*Y* 方向缩小 1/2）的情况，图形部分相似甚至完全不相似。

程序格式：

SCALE X_ Y_ Z_；	*X*、*Y*、*Z* 值表示缩放比例
ASCALE X_ Y_ Z_；	在单独的 NC 程序段中编程

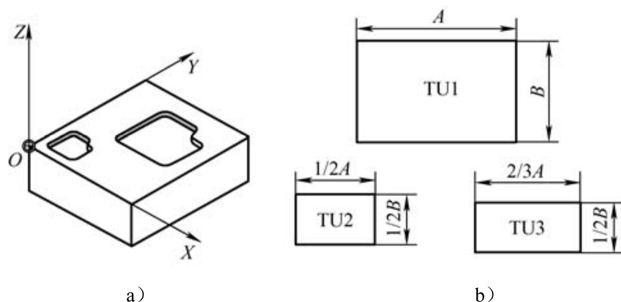


图 2-34　SCALE 比例缩放

4. 镜像功能

如图 2-35 所示，四个槽分别关于 *X* 轴、*Y* 轴对称，只需编写其中一个槽的子程序编程，

另外三个槽用镜像操作指令即可完成，程序格式为：

MIRROR X_ Y_ Z_；

例 1：平面旋转机座的数控编程

编写图 2-33a 所示的平面旋转机座的加工程序。

1．工艺分析

平面旋转机座由三个形状相同的凸块组成，先编写出其中一凸台的加工程序，即原始程序 YUANSHI.SPF。如图 2-36 所示，通过坐标变换——平移功能 TRANS、旋转完成另外几个凸台的加工，且凸台均在加工平面内旋转，其刀具轴不变，采用 RPL 坐标旋转方式编程。

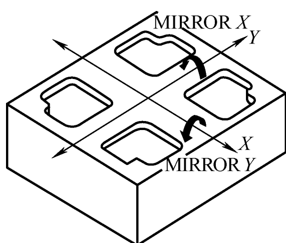


图 2-35　镜像功能

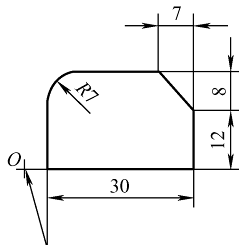


图 2-36　机座凸台进给路线

2．数控编程

原始子程序：

YUANSHI.SPF；	原始子程序名
N01 G54 G90 G00 X0 Y−15；	走到起点 *ST*，起刀点到工件的距离大于刀具直径
N02 G01 G41 D02 X0 Y0；	走到 *O* 点，完成刀补，如图 2-42 所示
N03 G01 X=30−7；	
N04 G02 X7 Y7 CR=7；	加工 *R*7mm 的圆弧
N05 G01 X=30−10；	
N06 G01 X30 Y20；	加工 45°斜边
N07 G01 Y0；	
N08 G01 X0 Y0；	刀具走到 *O* 点
N09 G00 X0 Y−15 M05；	回到起点
N10 M02；	程序结束

主程序：

PINMIANXZ.MPF；	平面旋转机座主程序名
N05 G17 G54 Z10；	选择工作平面 *OXY*，工件零点偏置设定为 G54
N10 M03 S600 F100；	
N15 TRANS X20 Y10；	绝对平移，加工水平凸台
N20 YUANSHI；	调用子程序加工
N25 TRANS X55 Y35；	绝对平移到（X55，Y35）的位置（第一次平移）
N30 TRANS PPL=45；	在加工平面内绕刀具轴（第一次）旋转
N35 YUANSHI；	子程序调用，加工
N40 TRANS X20 Y40；	绝对平移到（X20，Y40）的位置（第二次平移）
N45 TRANS PPL=60；	在加工平面内绕刀具轴（第二次）旋转
N50 YUANSHI；	调用子程序加工
N55 G00 Y50 Z50；	抬刀到安全位置
N60 ROT；	取消坐标旋转

N65 TRANS；　　取消坐标平移
N70 M30；

注：N40、N45 也可以用增量方式：

N40 ATRANS X−35 Y5；　　增量平移到（X−35，Y5）的位置（第二次平移）
N45 ATRANS PPL=15；　　在加工平面内绕刀具轴（第二次）增量旋转 15°

点　评

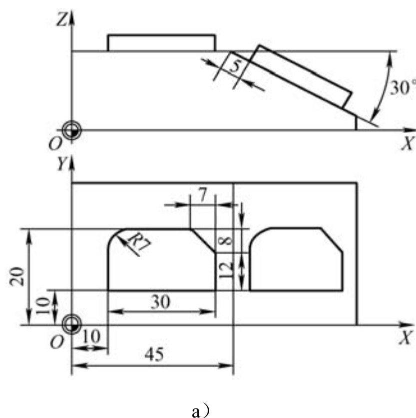
本例中的三个凸台分别用了平移与旋转功能编程，其中一个只用一次平移即可，另两个凸台要同时用到平移与旋转功能，至于是先平移还先旋转，本例没有先后顺序关系，但在下一例中，先后顺序就有很大的关系了，需要特别注意它们之间的区别。

例 2：空间旋转机座的数控编程

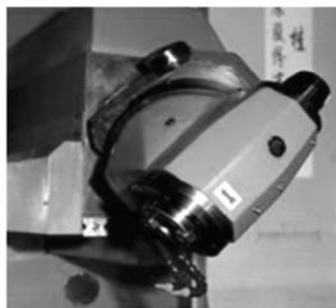
如图 2−37a 所示，要加工两个凸台轮廓面，凸台高度为 5mm，凸台轮廓的原始状态与上例相同，其中的一个凸台在空间绕 *Y* 坐标轴旋转了 30°，试编写程序。

1. 工艺分析

加工旋转机座的先决条件。在旋转的 *Z* 方向，刀具必须垂直于倾斜表面，因此要求机床带有角度铣头（图 2−37b），这是加工旋转机座的先决条件。



a）



b）

图 2−37　空间旋转机座

对于大小、形状完全相同的凸台，可以先编写出其中一凸台的加工程序，即原始程序 YUANSHI.SPF（同上例），通过运用坐标变换——平移功能 TRANS、旋转功能 ROT 完成另一个台的加工，工件装夹视情况选用合适的夹具，选用ϕ10mm 立式铣刀。

2. 加工程序

主程序如下：

XUANTAI.MPF；
N05 G17 G54 Z10；　　选择工作平面 *OXY*，工件零点偏置设定为 G54
N10 M03 S600 F100；
N15 TRANS X10 Y10；　　绝对平移，加工水平凸台
N20 YUANSHI；　　调用子程序加工
N25 ATRANS X35；　　增量平移（第一次平移）

```
N30 AROT Y30;                       关于Y轴（空间）旋转
N35 ATRANS X5;                      增量平移（第二次平移）
N40 YUANSHI;                        调用子程序，加工斜面凸台
N45 G00 Y50 Z50;                    抬刀到安全位置
N50 ROT;                            取消坐标旋转
N55 TRANS;                          取消坐标平移
N60 M30;
```

本例中综合应用了坐标变换——平移（TRANS）与旋转（ROT）的功能，加工水平凸台时，只需坐标的平移即可，对于斜面上的凸台，平移与旋转要同时应用，要经过两次平移、一次旋转才能完成，其顺序为"平移—旋转—平移"，若采用"平移—平移—旋转"，则第二次平移的值不是 5mm，而是 5/cos 30°=5.774，也可以先旋转再平移，第二次平移同样是 5.774mm，只有第一种情况才是 5mm，所以要特别注意。

例 3：压力机凸模座的加工

加工图 2-38 所示的凸模座，工件上有五个大小、形状完全相同的凸台，每个凸台的有效厚度为 5mm，各凸台的相对位置在图上已标出，轮廓表面粗糙度按 *Ra*12.5μm 加工，其余为不加工。试编写加工程序。

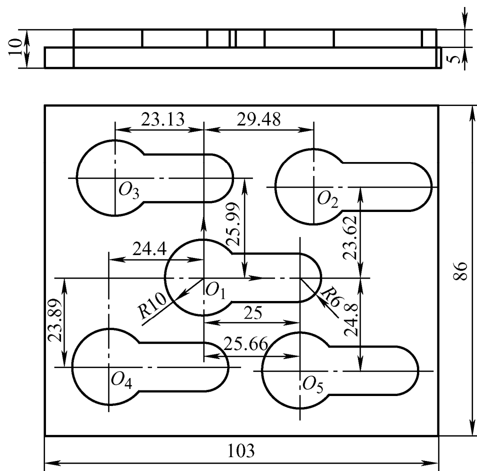


图 2-38　凸模座

1. 工艺分析

压力机凸模座上，有五个大小、形状完全相同的凸台轮廓，可以先编写出其中一个凸台轮廓的加工程序，把它命名为原始程序 TUTAI.SPF，通过运用坐标变换——平移功能 TRANS、ATRANS 完成其余几个的加工，选用 ϕ12mm 立式铣刀，圆弧与直线相交处按铣刀半径过渡处理即可。

为了提高轮廓表面的质量，引入了"圆弧切入切出"程序段并使用了刀具补偿功能，要求刀具起点 *ST* 到工件切入点的距离必须大于刀具直径才能完成补偿。凸台轮廓的进给路线如图 2-39 所示。

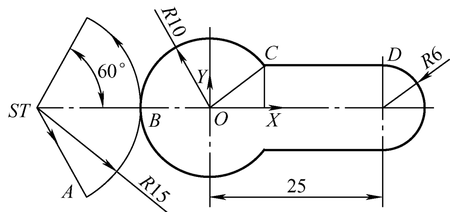


图 2-39　凸台轮廓的进给路线

2. 工件的装卡

工件的厚度为 10mm，加工凸台的有效厚度为 5mm，工件薄，容易变形，为了方便装卡及加工，工件必须露出钳口 5.5mm 以上，夹紧力大小要适度，注意防止工件夹紧过程中的变形，工件找正时，将百分表用磁性表座固定在主轴上，百分表触头接触工件已加工表面，在前后或左右方向移动主轴，找正工件上下平面与工作台的平行度；同样在侧平面内移动主轴，找正工件侧面与轴向进给方向的平行度。如果不平行，可用铜棒轻敲工件或采用加垫片调整的办法纠正，然后再重新找正，误差小于 0.02mm。加工中应特别注意不要铣到夹具。

3. 坐标计算

A：$X=-25-15\cos 60°$，$Y=15\sin 60°$

C：$X=\sqrt{10^2-6^2}$ ，Y=6

在设计凸模进给路线时，要考虑：坐标设定、起点、进给方向、切入切出方式、坐标计算及编程方法。

4. 编制程序

凸台轮廓 R 参数子程序：

```
TUTAI.SPF;                                     凸台原始程序
N05 G90 G00 X−25 Y0 Z5;                        走到起点ST，起刀点ST到工件切入点的距离大于刀具直径
N10 M03 S600 F200;                             一般在主程序中给出 M、S、F 的值
N15 G01 Z=−R01;                                下刀，凸台深度由主程序控制
N20 G41 D01 X=− (25−15*COS(60)) Y=15*SIN(60);
                                               走到A点，完成刀补
N25 G03 X−10 Y0 CR=15;                         圆弧切入工件B点
N30 G02 X=SQRT(10*10−6*6) Y6 CR=10;            加工工件圆弧走到C点
N35 G01 X25 Y6;                                刀具走到D点
N40 G02 X25 Y−6 AR=180;                        用圆心和圆心角方式编写圆弧程序
N45 G01 X=SQRT(10*10−6*6);
N50 G02 X−10 Y0 CR=10;
N55 G03 X=− (25−15*COS(60)) Y=15*SIN(60);
                                               圆弧切出工件，表达式求坐标值
N60 G41 G00 D00 X−25 Y0 M05;                   用 D00 取消刀补，回到起点
N65 Z6;                                        抬刀高度 6mm
N70 TRANS;                                     取消坐标平移
N75 ROT;                                       取消坐标旋转
N80 SCALE;                                     取消比例缩放
N85 M17;                                       子程序结束，也可以用 RET
```

加工凸模座主程序：

```
WUGETUTAI.MPF;                                 五个凸台的主程序
N05 G54 G90 G17;                               选定工作平面OXY，定义工件零点
N10 G00 X0 Y0;                                 刀具到达起始点ST
N15 M03 S600 F200;
N20 TUTAI R01=5;                               调用原始状态的凸台子程序 TUTAI 加工第一个凸台
N25 TRANS X29.48 Y23.62;                       坐标平移到第二个凸台的位置
N30 TUTAI;                                     调用原始状态的凸台子程序 TUTAI 加工第二个凸台
N35 TRANS X−23.13 Y25.99;                      坐标平移到第三个凸台的位置
N40 TUTAI;                                     调用原始状态的凸台子程序 TUTAI 加工第三个凸台
N45 TRANS X−24.4 Y−23.89;                      坐标平移到第四个凸台的位置
N50 TUTAI;                                     调用原始状态的凸台子程序 TUTAI 加工第四个凸台
N55 TRANS X25.66 Y−24.8;                       坐标平移到第五个凸台的位置
N60 TUTAI;                                     调用原始状态的凸台子程序 TUTAI 加工第五个凸台
N65 G00 Z20;
N70 TRANS;                                     取消坐标平移
N75 M30;
```

例 4：冲床凹模座的加工

图 2-40 所示为冲床凹模座，工件外形尺寸为 175mm×130mm×18.5mm，除上表面以外的

其他表面均已加工完成，材料为 45 钢，制订正确的工艺方案，选择合理的刀具和切削工艺参数，所需各点的坐标值见表 2-8，试编制其数控加工程序。

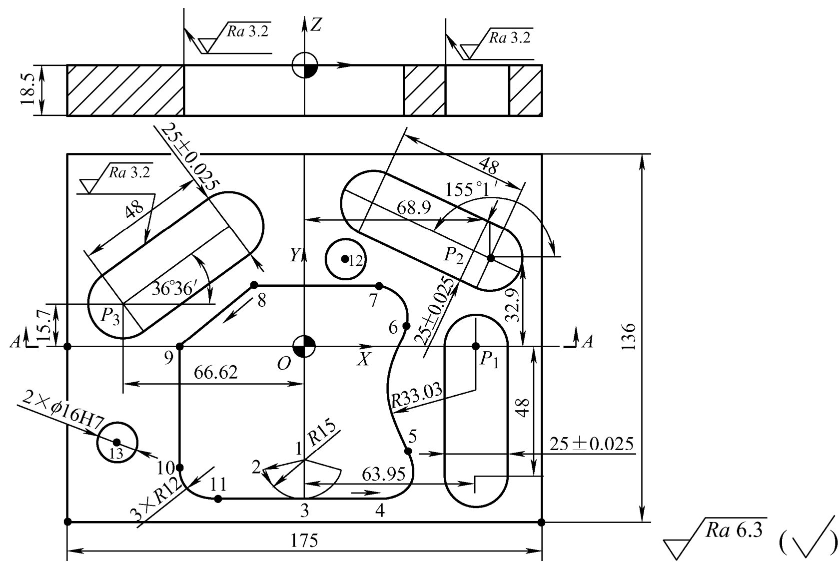


图 2-40　冲床凹模座

表 2-8　凹模座内轮廓各点坐标值

序　　号	X	Y	序　　号	X	Y
1	0	−42.07	8	−18.86	22.30
2	−14.45	−46.08	9	−44.72	0
3	0	−57.07	10	−44.72	−45.07
4	29.68	−57.07	11	−32.72	−57.07
5	38.81	−37.28	12	15.78	31.82
6	37.05	3.33	13	−67.87	−36.11
7	27.28	22.30			

1. 工艺分析

由于零件外形规则，被加工部分的各尺寸、形位、表面粗糙度值要求较高。零件结构简单，包含了平面、圆弧、内外轮廓、挖槽、钻孔、镗孔、铰孔等，且大部分的尺寸均达到 IT7～IT8 级精度，其上的三个 48mm×250mm 的键槽是在当前工作平面内围绕刀具轴旋转一定角度，属于平面旋转，采用 PPL 指令即可实现。

该工件选用机用虎钳装夹为宜，找正机用虎钳固定钳口，使之与工作台 *X* 轴移动方向平行。在工件下表面与机用虎钳之间放入精度较高的平行垫块（垫块的厚度与宽度要适当），利用木锤或铜棒敲击工件，使平行垫块不能移动后夹紧工件。利用寻边器找正工件 *X* 轴、*Y* 轴的工件零点，该工件零点位于工件上表面的中心位置，设置 *Z* 轴工件零点使其与机械零点重合，刀具长度补偿利用 *Z* 轴定位器设定。对于同一把刀具仍调用相等的刀具长度与半径补偿值，但它们设定的工件坐标系不同，也可不使用刀具长度补偿功能，而根据不同刀具设定多个工件坐标系零点进行编程加工。工件上表面为执行刀具长度补偿后的零点表面，

根据零件图样要求制订的数控加工工序内容，其中内腔轮廓的加工的起点设在 1 点位置，并设定了刀具切入切出方式，进给路线为 0→1→2→3→4→5→2→6→0，加工键槽的走刀轨迹如图 2-41 所示，各工序所用刀具的切削参数见表 2-9。

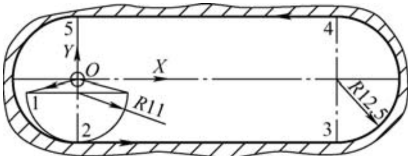


图 2-41　加工键槽的进给轨迹

表 2-9　各工序刀具的切削参数

加工步骤		刀具与切削参数					
序　号	加工内容	刀具规格		主轴转数/（r/min）	进给速度/（mm/min）	刀具补偿	
		类　型	材　料			长　度	半　径
1	粗加工上表面	ϕ80mm 面铣刀（Z=6）	硬质合金	450	300	H01/T01	D01
2	精加工上表面			800	160		
3	预钻各槽工艺孔	ϕ20mm 直柄麻花钻		550	80	H02/T02	D02
4	粗加工三个键槽及内腔	ϕ20mm 粗齿立铣刀（Z=4）	高速钢	500	80	H03/T03	D03
5	精加工三个键槽及内腔	ϕ20mm 细齿立铣刀（Z=6）		800	100	H04/T04	D04
6	孔加工	ϕ3mm 中心钻		1200	120	H05/T05	D05
7	钻孔加工	ϕ15.8mm 直柄麻花钻		550	80	H06/T06	D06
8	铰孔加工	ϕ16mm 机用铰刀		300	50	H07/T07	D07

1）铣削平面，保证尺寸 18.5mm，选用ϕ80mm 面铣刀。

2）在坐标原点及 P_1、P_2、P_3 处预钻各槽落刀孔，以便于铣削时立铣刀下刀，用ϕ20mm 直柄麻花钻通，若用键槽铣刀加工各槽，预钻孔可省。

3）粗加工三个键槽及内腔，选用ϕ20mm 粗齿立铣刀（Z=6）。

4）精加工三个键槽及内腔，选用ϕ20mm 细齿立铣刀（Z=4）。

5）钻中心孔，选用ϕ3mm 中心钻。

6）钻孔加工，选用ϕ15.8mm 直柄麻花钻。

7）铰孔加工，选用ϕ16mm 机用铰刀。凹模座内轮廓各点坐标值见表 2-6。

2. 程序编制

主程序如下：

```
PEIHEJIAN.MPF;                 凹模座主程序
N05 G54 G90 G00 Z10;           程序初始化
N10 M03 S450;                  选用φ80mm 面铣刀粗加工
N15 T01 D01;                   调用 1 号刀具的 1 号长度补偿
N20 X125 Y-35;                 X 轴、Y 轴快速定位
N25 Z0.3;                      Z 轴进刀，留 0.3mm 铣削深度余量
N30 G01 X-125 F300;            平面铣削，进给速度为 300mm/min
N35 G00 Y35;                   Y 轴快速定位
N40 G01 X125;                  平面铣削
```

N45 G00 Z50；	Z 轴快速退刀
N50 M05；	主轴停转
N55 M00；	程序暂停
N60 M03 S800；	
N65 G00 X125 Y−35 M07；	切削液开
N70 Z0；	Z 轴进刀
N75 G01 X−125 F160；	平面铣削
N80 G00 Y35；	快速定位
N85 G01 X125；	平面铣削
N90 G00 Z50 M09；	退刀，切削液关
N100 M05；	
N105 M00；	手动更换 ϕ20mm 钻头
N110 M03 S550 F80；	
N115 G00 Z50 T2 D2 M07；	调用 2 号刀具的 2 号长度补偿
N120 MCALL；	模态调用钻孔固定循环
N125 CYCLE81（5，0，5，23.65）；	钻落刀孔以便下刀（钻尖出工件，要完全钻通）
N130 X0 Y0；	在内腔（0，0）处，钻落刀孔
N135 X63.95 Y0；	钻键槽 P_1 落刀孔
N140 X68.9 Y32.9；	钻键槽 P_2 落刀孔
N145 X−66.2 Y15.7；	钻键槽 P_2 落刀孔
N150 X−66.62 Y15.7；	孔深$=18.5+10\cos\frac{118^\circ}{2}=23.65$
N155 MCALL；	取消模态调用
N160 G00 Z50 M09 M05；	抬刀、关切削液、主轴停转
N165 M00；	手动更换 ϕ20mm 粗齿立铣刀粗加工各槽
N170 M03 S500；	
N175 G00 Z50 T3 D3；	调用 3 号刀具的 3 号长度补偿
N180 X0 Y0 M07；	定位在原点，粗加工内腔
N185 Z1；	Z 向快速接近工件
N190 G01 Z−19 F40；	Z 向加工进给
N195 G01 X0 Y−42.07；	
N200 NEIQIAN；	调用加工内腔子程序 NEIQIAN
N205 G00 Z5；	
N210 X63.95 Y0；	定位在 P_1 点，粗加工 P_1 处键槽
N215 Z1；	
N220 G01 Z−19 F40；	Z 向加工进给
N225 JIANCAO R10=−90；	调用加工键槽子程序 JIANCAO
N230 G00 Z150 M09；	
N235 M05；	
N240 X63.95 Y0；	定位在 P_2 点，粗加工 P_2 处键槽
N245 Z1；	
N250 G01 Z−19 F40；	Z 向加工进给
N255 JIANCAO R10=155+1/60；	调用加工键槽子程序 JIANCAO
N260 G00 Z150 M09；	
N265 M05；	
N270 X63.95 Y0；	定位在 P_3 点，粗加工 P_3 处键槽
N275 Z1；	
N280 G01 Z−19 F40；	Z 向加工进给
N285 JIANCAO R10=36+36/60；	调用加工键槽子程序 JIANCAO
N290 G00 Z150 M09；	
N295 M05；	

```
N300 M00；                              手动更换φ20mm 细齿立铣刀精加工各槽
N305 M03 S500；
N310 G00 Z50 T4 D4；                    调用 4 号刀具的 4 号长度补偿
N315 X0 Y0 M07；                        定位在原点，粗加工内腔
N320 Z1；                               Z 向快速接近工件
N325 G01 Z−19 F40；                     Z 向加工进给
N330 G01 X0 Y−42.07；
N335 NEIQIAN；                          调用加工内腔子程序 NEIQIAN
N340 G00 Z5；
N345 X63.95 Y0；                        定位在 P1 点，粗加工 P1 处键槽
N350 Z1；
N355 G01 Z−19 F40；                     Z 向加工进给
N360 JIANCAO ROT=−90；                  调用加工键槽子程序 JIANCAO
N365 G00 Z150 M09；
N370 M05；
N375 X63.95 Y0；                        定位在 P2 点，粗加工 P2 处键槽
N380 Z1；
N385 G01 Z−19 F40；                     Z 向加工进给
N390 JIANCAO R10=155+1/60；             调用加工键槽子程序 JIANCAO
N395 G00 Z150 M09；
N400 M05；
N405 X63.95 Y0；                        定位在 P3 点，粗加工 P3 处键槽
N410 Z1；
N415 G01 Z−19 F40；                     Z 向加工进给
N420 JIANCAO R10=36+36/60；             调用加工键槽子程序 JIANCAO
N425 G00 Z150 M09；
N430 M05；
N435 M00；                              手动更换φ3mm 中心钻
N440 M42；                              主轴选用高速挡（800～4000r/min）
N445 M03 S1200 F120；
N450 G00 Z150 T5 D5；                   调用 5 号刀具的 5 号长度补偿
N455 X15.78 Y31.82；                    用固定循环指令进行孔加工
N460 CYCLE81（5，0，5，3）；            用φ3mm 中心钻钻 12 孔
N465 X−67.87 Y−36.11；
N470 CYCLE81（5，0，5，3）；            用φ3mm 中心钻钻 13 孔
N475 G00 Z50；
N480 M05；
N485 M00；                              手动更换φ15.8mm 直柄麻花钻钻各孔
N490 M41；                              主轴选用低速挡（50～800r/min）
N495 M03 S550 F80；
N500 G00 Z50 T6 D6；                    调用 6 号刀具的 6 号长度补偿
N505 X15.78 Y31.82 M07；                用φ15.8mm 麻花钻钻 12 孔

N510 CYCLE83（  5，  0，   5，−16，6，  −5，    5，   0，   0，   1，   1，   1）；
   与 CYCLE83（RTP, RFP, SDIS, DP, DPR, FDEP, FDPR, DAM, DTB, DTS, FRF, VARI)中各项对应
N515 X−67.87 Y−36.11；                  用φ15.8mm 麻花钻钻 13 孔
N520 G00 Z150 M09；
N525 CYCLE83（5，0，5，−16，16，−5，5，0，0，1，1，1）
N530 M05；
N535 M00；                              手动更换φ16mm 机用铰刀铰各孔
N540 M03 S300 F50；
```

```
N545 G00 Z50 T6 D1 M07;                    调用 6 号刀具的 6 号长度补偿
N550 X15.78 Y31.82 M07;                    用φ16mm 铰刀铰 12 孔
N555 CYCLE85（10，0，2，−16，16，0，50，50）;
                                           固定循环指令铰孔
N560 X−67.87 Y−36.11;                      用φ16mm 铰刀铰 13 孔
N565 CYCLE85（10，0，2，−16，16，0，50，50）;
N570 G00 Z−50 G40 M09;                     取消刀具长度补偿
N575 M30;                                  程序结束
```

加工内腔子程序如下：

```
NEIQIAN.SPF;
N05 G90 G17 X0 Y0;                         刀具走到起刀点
N10 G01 G41 D02 X−14.45 Y−46.08;
                                           建立刀具半径补偿，到达 2 点
N15 G03 X0 Y−57.07 CR=15;                  圆弧切入达到 3 点
N20 G01 X29.68 Y−57.07;                    开始加工内轮廓
N25 G03 X38.81 Y−37.28 CR=12;
N30 G02 X37.05 Y3.33 CR=33.03;
N35 G03 X27.28 Y22.3 CR=12;
N40 G01 X−18.86 Y22.3;
N45 X−44.72 Y0;
N50 Y−45.07;
N55 G03 X−32.72 Y−57.07 CR=12;
N60 G01 X0 Y−57.07;                        内轮廓加工结束
N65 G03 X14.45 Y−46.08 CR=15;              圆弧切出
N70 G01 D00 X0 Y−42.07;                    D00 取消刀具半径补偿
N75 X0 Y0 Z20;                             回到原点并抬刀
N80 RET;                                   子程序结束，返回主程序调用处
```

加工键槽子程序如下

```
JIANCAO.SPF;
N05 PPL=R10;                               平面内坐标旋转，R10 设为旋转角度参数
N10 G01 G41 D06 X−11 Y=−5.94;              走到 1 点完成刀补（过度圆半径为 11）
N15 G03 X0 Y−12.5 CR=11;                   通过“过度圆”圆弧切入工件，到达 2 点
N20 G01 X48 Y−12.5;                        切工件直边，到达 3 点
N25 G02 X48 Y12.5 CR=12.5;                 切工件右半圆，到达 4 点
N30 G01 X0 Y12.5;                          切工件直边，到达 5 点
N35 G02 X0 Y−12.5 CR=12.5;                 切工件左半圆，到达 2 点
N40 G03 X11 Y−5.94 CR=11;                  通过“过度圆”圆弧切出工件
N45 G01 G41 D00 X0 Y0;                     D00 取消刀具半径补偿，回到 O 点，完成加工
N50 ROT;                                   取消坐标旋转
N55 RET;                                   子程序结束，返回主程序调用处
```

点　评

这是一个综合性很强的例子，涉及平面、圆弧、轮廓、挖槽、钻孔、铰孔及预加工等内容，工艺复杂；在编程方面，应用了坐标变换、子程序调用、钻孔固定循环及参数赋值等。在子程序编写方面，考虑到加工多个不同旋转的键槽需要及方便主程序调用，设计了 ROT=R10 参数格式，只要主程序在调用时，给 R10 赋值，就能实现各槽的不同旋转角度，这在后面的第 5 章中有更详细的例子。

2.9 比例缩放与镜像编程

例 1：蒸汽锤模座的加工

利用图 2-42 所示的凸模设计出图 2-44 所示的蒸汽锤模座。蒸汽锤模座上有若干个大小不同、位置不同但形状相似的模台，模台是由半圆或直边构成的，各模台的有效厚度及相对位置在图上已标出，模台轮廓表面粗糙度按 *Ra*12.5μm 加工，工件上、下表面已加工好，其余为不加工。试编写加工程序。

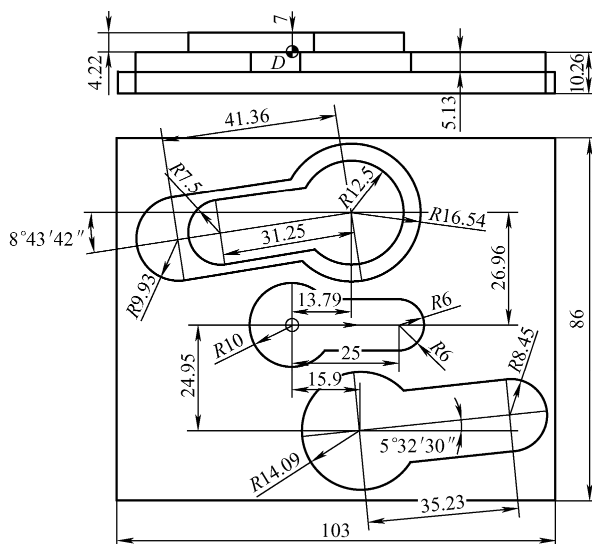


图 2-42　蒸汽锤模座

1. 工艺分析

针对四个大小不同但形状完全相似的模台，可以预先编写出其中一模台的加工程序，即 2.8 节例 3 中的原始程序 TUTAI.SPF，通过运用坐标变换——坐标平移 TRANS、旋转 ROT 与比例缩放 SCALE 功能完成其余几个的加工，工件用压板装夹，选用ϕ12mm 立式铣刀，圆弧与直线相交处按铣刀半径进行过渡处理即可。

2. 蒸汽锤模座加工程序

SIGETUTAI.MPF；	加工蒸汽锤模座主程序
N05 G54 G90 G17；	选定工作平面 *OXY*，定义工件零点
N10 G00 X0 Y0；	刀具到达起始点 *ST*（图中无，参考图 2-45）
N15 M03 S600 F200；	
N20 TUTAI R01=5；	调用原始状态的模台子程序 TUTAI 加工第一个模台
N25 TRANS X29.48 Y23.62；	坐标平移到 *R*16.54mm 的第二个模台的位置
N30 PPL=188+43/60+42/3600；	*Z* 轴坐标旋转角度，换算成度
N35 SCALE X1.654 Y1.654；	原始状态的模台 *X*、*Y* 同时放大 1.654 倍
N40 TUTAI；	调用原始状态的凸台子程序加工第二个凸台
N45 SCALE X1.25 Y1.25；	原始状态的模台 *X*、*Y* 同时放大 1.25 倍
N50 TUTAI R01=0；	调用原始状态的模台子程序加工第三个模台
N55 TRANS X15.9 Y−24.95；	坐标平移到 *R*14.09mm 的第四个模台的位置
N60 ROT Z=5+32/60+30/3600；	*Z* 轴坐标旋转角度

```
N65 SCALE X1.409 Y1.409;                原始状态的模台 X、Y 同时放大 1.409 倍
N70 TUTAI R01=5;                        调用原始状态的凸台子程序加工第四个凸台
M75 M30
```

点　评

本例中，应用了子程序调用功能，由于各凸台形状完全相似，通过子程序调用减少编程工作量，通过运用坐标变换——坐标平移 TRANS、旋转 ROT 与比例缩放 SCALE 功能实现了大小不同、位置不同、角度不同的相似形的加工，进一步减轻编程工作量，在以后还可以看到 SINUMERIK 840D FRAME 编程中的镜像功能（MIRROR、AMIRROR），并将在第 5 章中看到 840D FRAME 编程的综合例子。

本例中，由于各凸台高度不一样高，为了便于编写与调用子程序，在子程序使用了 R 参数并在主程序中给各凸台高度（深度）赋值。

例 2：不同象限凸块的加工

图 2-43 所示的工件上有四个大小、形状完全相同的凸块，但方向不同，它们均为轴对称图形，各凸块的有效厚度为 10mm，相关坐标位置在图上已标出，各凸块轮廓表面粗糙度按 *Ra*12.5μm 加工，工件上、下面已加工好，其余为不加工。试编写加工程序。

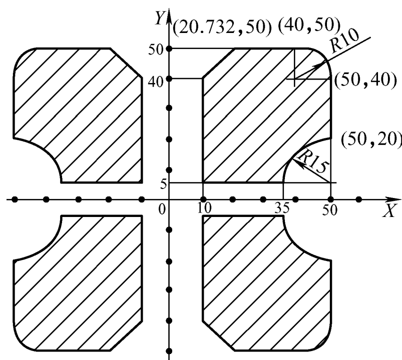


图 2-43 不同象限凸块的加工

1. 题意分析

从零件图可以看出，四个不同象限凸块，分别关于 *X* 轴、*Y* 轴对称，因此可以利用镜像功能，达到简化编程的目的，先以第一象限凸块编写原始子程序。

2. 程序编制

（1）凸块原始子程序

```
KUAI.SPF;
N05 G01 Z-10;
N10 G41 X10 D02;                        产生刀补
N15 Y40;
N20 X20.732 Y50;
N25 X40;
N30 G02 X50 Y40 CR=10;
N35 G01 Y20;
N40 G03 X35 Y5 CR=15;
N45 G01 X5;
N50 G40 X0 Y0;
N55 G00 Z5;
N60 M17 (RETI);                         RETI 还具有返回到调用处的功能
```

（2）加工零件主程序

```
JINGXIAN.MPF;
N05 G54 G17 G90;                        程序初始化
N10 M03 S1000 F100;
N15 G00 X0 Y0;
```

```
N20 Z25;
N25 KUAI;                        加工第一象限的凸块
N30 MIRROR X0;                   关于 Y 轴对称
/N35 KUAI;                       加工第二象限的凸块
N40 MIRROR;                      关于 X 轴对称
N45 KUAI;                        加工第三象限凸块
N50 AMIRROR X0;                  关于 Y 轴对称
/ N55 KUAI;                      加工第四象限凸块“/”为程序段选择性跳读
N60 MIRROR;
N65 G00 Z13;
N70 M30;
```

点　评

本例中，若没有二、四象限的凸台，只有一、三象限的凸台，这时仅在主程序中，N35、N55 跳开即可。

2.10　孔加工固定循环

相关知识点

孔深与孔径之比简称深径比，用 *L*/*D* 表示，当 *L*/*D*≤3 时为浅孔；当 3<*L*/*D*≤5 时为一般孔；当 5<*L*/*D*≤10 时属于较深孔，常在铣镗床、钻床上用深孔刀具或用接长麻花钻加工；当 10<*L*/*D*≤30 时属中等深孔，当 *L*/*D*≥30 时属特殊深孔（图 2-44），必须用深孔机床或专用设备，并使用深孔刀具加工。

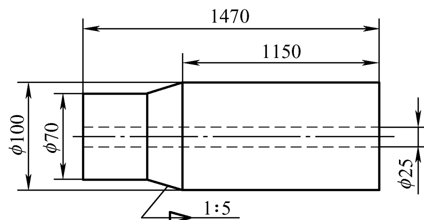


图 2-44　*L*/*D*≥30 的特殊深孔

铣镗固定循环指令（CYCLE81～CYCLE89）：

在 SINUMERIK 840D 数控系统中，CYCLE81～CYCLE89 属于非模态指令。为简化加工程序的编制，可采用 MCALL 方式实现模态调用，其格式如下：

```
CYCLE81(RTP, RFP, SDIS, DP, DPR);
MCALL CYCLE81(RTP, RFP, SDIS, DP, DPR);
…
MCALL;
```

其中：

MCALL——相当于括号，表示范围。

RTP——返回平面，要求高于工件最高台阶面。

RETURN——返回。

SDIS——钻孔时，刀具快速接近工件时的安全距离。

RFP——参考平面，一般将孔口所在的平面设为参考平面。

1．浅孔钻削循环 CYCLE81

CYCLE81 用于钻 3<*L*/*D*<5 比较浅的通孔，如图 4-45a 所示，CYCLE81 参数及功能说

明见表 2-10。

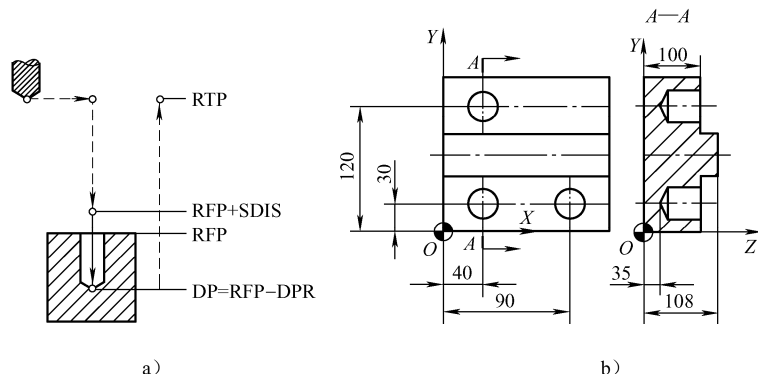


图 2-45 浅孔钻削循环

表 2-10 CYCLE81 参数及功能说明

RTP	返回平面（绝对值）
RFP	参考平面（孔口的位置：绝对值）
SDIS	安全距离（无符号数）
DP	钻削深度（绝对值，相对于坐标平面的深度）
DPR	相对参考平面的钻削深度（无符号数）DP 或 DPR 定义孔深，两者选一

钻削图 2-47b 所示三个浅孔的程序片段如下：

```
…
N30 MACALL CYCLE81（113, 100, 5, 35，）；调用 CYCLE81 并赋参数值
N40 G00 X90 Y30；                        到第一个的位置开始钻孔
N45 CYCLE81（113, 100, 5, 35，）；        调用 CYCLE81 并赋参数值
N50 G00 X40 Y30；                        到第二个的位置开始钻孔
N55 CYCLE81（113, 100, 5, 35，）；        调用 CYCLE81 并赋参数值
N60 G00 X40 Y120；                       到第三个的位置开始钻孔
N70 MACALL；                             钻孔循环结束
…
```

也可以将 N30 句改为：

N30 MCALL CYCLE81（110, 100, 2, , 65）；

注意：

1）RTP：返回平面的确定。

2）MCALL 相当于括号，表示范围。

3）孔深 DP、DPR 数据要对号入座，如：（113, 100, 5, , 65）。

2. 钻削循环 CYCLE82

CYCLE82 用于加工不通孔、台阶孔，即孔底有要求。如图 2-46a 所示，该指令属于沉孔（锪孔）的钻削加工固定循环，用这个固定循环可以锪沉孔或镗沉孔。

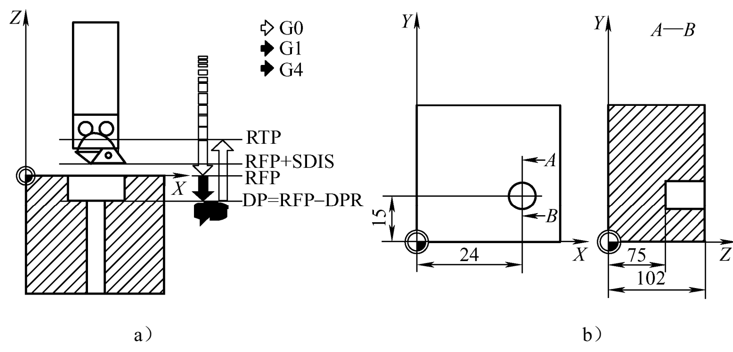


图 2-46　CYCLE82 固定循环

程序格式：

CYCLE82 (RTP, RFP, SDIS, DP, DPR，DTB)；

其中，DTB 为孔底暂停时间，暂停时间过长，会加速钻头磨损，以 0.2～1s 为宜。

钻削图 4-48b 所示的不通孔，程序片段如下：

…

N30 G00 X24 Y15；

N40 CYCLE82 (110, 102, 4, 75, 2)；孔底暂停 2s

…

3. 钻削循环 CYCLE83

CYCLE83 用于加工 *L*/*D*≥5～20 的深孔，常在铣镗床、钻床或车床上用深孔刀具或接长麻花钻加工，如图 2-47a 所示，CYCLE83 参数及功能说明见表 2-11。

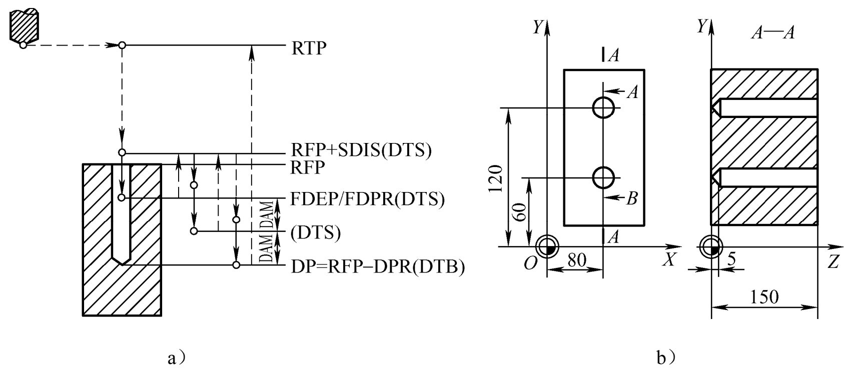


图 2-47　CYCLE83 固定循环

表 2-11　CYCLE83 参数及功能说明

FDEP	第一次钻削深度（绝对值）FDEP 或 FDPR 定义第一次钻削深度，两者选一
FDPR	相对于参考平面的第一次钻削深度（无符号数）
DAM	其余每次钻削深度（无符号数）
DTB	孔底暂停时间（断屑）
DTS	在起始点和排屑点停留时间
FRF	第一次钻削深度的进给速度系数（无符号数），取值范围为 0.001～1
VAR	加工方式，1—排屑，0—断屑，该指令属于钻孔的钻削加工固定循环

程序格式：

CYCLE83(RTP, RFP, SDIS, DP, DPR, FDEP, FDPR, DAM, DTB, DTS, FRF, VARI)；

参数及功能说明：

CYCLE83 参数中的前五个同 CYCLE81，其动作是第一次钻进一定深度、孔底暂停、提钻到孔口排屑并暂停一定时间，完成第一次钻孔循环；再快进到上次孔底上方一个安全的位置，第二次钻孔到一定深度、孔底暂停、提钻到孔口排屑并暂停一定时间，完成第二次钻孔循环；以后重复多次。CYCLE83 中的 FDEP 或 FDPR 用以定义第一次钻削深度，两者选一。钻削图 4-49b 所示的两深孔，程序片段如下：

```
…
N30 G00 X80 Y120；                                   钻第一个深孔
N40 CYCLE83(153, 150, 3, , 145, 100, , 20, 1, 1, 0.9, 1，)；
N50 G00 X80 Y60；                                    钻第二个深孔
N60 CYCLE83(155, 150, 1, , 145, , 50, 20, 1, 0.5, 0.8, 1)；
…
```

例 1：台阶孔加工

加工图 2-48 所示零件上的 17 个孔，其中 1～10 号孔直径为 20mm、孔深为 40mm 的浅孔；1l～14 号孔是直径为 14mm、孔深为 20mm 的不通孔；15～17 号孔是直径为 10mm、孔深为 60mm 的深孔，试编写加工程序。

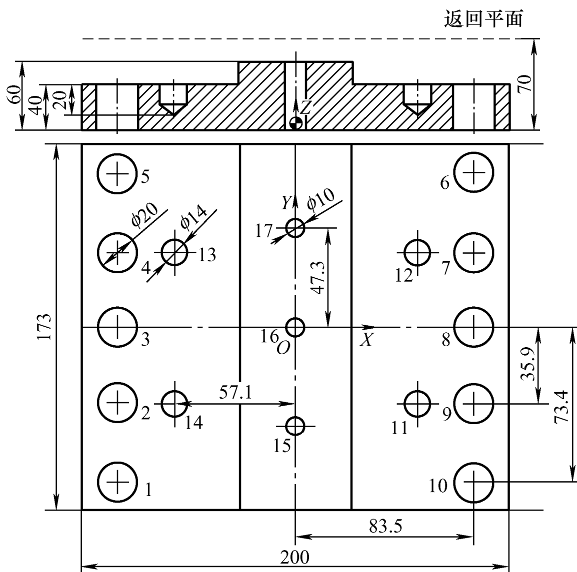


图 2-48　固定循环功能应用举例

工艺分析：

为了提高孔的定位精度，所有的孔先用ϕ3mm 中心钻（T1）定出孔位置，中心钻的长度补偿地址为 D01，然后再加工各孔。由于各孔的尺寸不同，因此需选用不同尺寸的刀具加工，钻 1～10 号孔用 2 号刀具ϕ20mm 钻头，刀具长度补偿地址为 D02；钻 11～14 号孔用 3 号刀具ϕ20mm 钻头，刀具长度补偿地址为 D03：钻 15～17 号孔用ϕ10mm 的钻头，刀具长度补偿地址为 D04；每把刀具的具体长度补偿值，既可以通过机外对刀仪进行测量，也可以通过在机床上的 *Z* 方向进行对刀来确定。

编程坐标系如图所示，零件60mm高的表面为 *Z* 向零点。1～14号孔和15～17号孔所在的平面不同，在编程时要特别注意各孔的参考平面与返回平面，否则会发生撞刀事故，为了安全，把返回平面定在 *Z*=70mm 的位置，各孔的安全距离设定为5mm。程序如下：

```
SHENKONG.MPF；
N05 G90 G54 G00 F60 S600 M03；
N10 D01 T01 Z100；                          选φ3mm中心钻（T1）
N15 MCALL CYCLE81（  70,  40,    5,  ,   3）；
          CYCLE81（RETP, RFP, SDIS, DP, DPR）；指令对照，数据对号入座
N20 X−83.5 Y−73.4；                         钻1号孔的中心孔
N25 X−83.5 Y−35.9；                         钻2号孔的中心孔
N30 X−83.5 Y0；                             钻3号孔的中心孔
N35 X−83.5 Y35.9；                          钻4号孔的中心孔
N40 X−83.5 Y73.4；                          钻5号孔的中心孔
N45 X−57.1 Y35.9；                          钻13号孔的中心孔
N50 X−57.1 Y−35.9；                         钻14号孔的中心孔
N55 X83.5 Y−73.4；                          钻10号孔的中心孔
N60 X83.5 Y−35.9；                          钻9号孔的中心孔
N65 X83.5 Y0；                              钻8号孔的中心孔
N70 X83.5 Y35.9；                           钻7号孔的中心孔
N75 X83.5 Y73.4；                           钻6号孔的中心孔
N80 X57.1 Y35.9；                           钻12号孔的中心孔
N85 X57.1 Y−35.9；                          钻11号孔的中心孔
N90 MCALL；                                 钻中心孔循环结束
N95 M00；                                   程序暂停

N100 CYCLE81（  70,  60,    5,  ,   3）；
     CYCLE81 (RETP, RFP, SDIS, DP, DPR)；数据一定要对号入座，切勿填错。5与3之间的两个逗号一
     个不能少！
N105 X0 Y−47.3；                            钻15号孔的中心孔
N110 X0 Y0；                                钻16号孔的中心孔
N115 X0 Y47.3；                             钻17号孔的中心孔
N120 MCALL；
N125 D2 T2 Z100；                           选φ20mm钻头（T2）
N130 MCALL CYCLE81（70, 40, 5,，45.15）；
N135 X−83.5 Y−73.4；                        钻1号孔
N145 X−83.5 Y0；                            钻3号孔
N150 X−83.5 Y35.9；                         钻4号孔
N155 X−83.5 Y73.4；                         钻5号孔
N160 X83.5 Y73.4；                          钻6号孔
N165 X83.5 Y35.9；                          钻7号孔
N170 X83.5 Y0；                             钻8号孔
N175 X83.5 Y−35.9；                         钻9号孔
N180 X83.5 Y−73.4；                         钻10号孔
N185 MCALL；
N190 M00；
N195 D03 T03 Z100；                         选φ14mm钻头（T3）；
N200 MCALL CYCLE82（  70,  40,    5,  ,  20，  1）；
          CYCLE82（RETP, RFP, SDIS, DP, DPR, DTB）；指令对照，数据对号入座
N205 X57.1 Y−35.9；                     钻11号孔
N210 X57.1 Y35.9；                      钻12号孔
```

```
N215 X−57.1 Y35.9；                          钻 13 号孔
N220 X−57.1 Y−35.9；                         钻 14 号孔
N225 MCALL；
N230 M00；
N235 D04 T04 Z100；                          选φ10mm 钻头（T4）；
N240 CYCLE83 (     70,   60,      5, −2.58,    ,     30,          ,       1,   0.5,     1,   0.9,        1)；
     CYCLE83 (RETP, RFP, SDIS, DP, DPR, FDEP, FDPR, DAM, DTB, DTS, FRF, VARI)；指令对照，数据对号入座
N245 X0 Y−47.3；                             钻 15 号孔
N250 X0 Y0；                                 钻 16 号孔
N255 X0 Y47.3；                              钻 17 号孔
N260 MCALL；
N265 M30；
```

点　评

本例中，CYCLE81、CYCLE82、CYCLE83 中的各参数填写一定要对号入座，可有时很容易填错，这个问题可以通过下面的例子得到解决，请读者注意。

例 2：加工呈矩阵排列的孔

如图 2-49 所示，有 5 行×5 列呈矩阵排列的孔，孔径为ϕ10mm，孔深为 80mm，深径比 L/D=8，在 5～20 之间，属较深的孔，采用 CYCLE83 指令钻削加工，试编写程序。

图 2-49　矩阵排列的孔

1．题意分析

工件上要加工的孔数量较多，每个孔的加工动作又是一样的，所以各孔的数控加工程序也一样，为了提高编程效率，采用孔加工固定循环编程，在 SINUMERIK 840D 数控系统中，用 CYCLE81～CYCLE89 指令。

为简化加工程序的编制，可采用 MCALL 方式实现模态调用。

2．加工程序

钻孔主程序：

```
JUZHENKONG.MPF；                                  钻孔主程序名
N05 G00 G54 X0 Y0 Z130；
```

```
N10 M03 S300 F150；
N15 RFP=102 DP=75 RTP=105；                            给各参数赋值
N20 SDIS=3 FDIS=10 ZAEL=0；                            解决容易填错的问题
N25 SPCA=30 SPCO=20；                                  矩阵孔的起始位置
N30 STA1=0 DBH=10 FDIS=10；
N35 STA1=0；                                           每行倾斜角度
N40 HJ=10, LJ=10；                                     行距，列距
N45 HNUM=5, LNUM=5；                                   行数，列数
N50 JZK；                                              调用子程序
N55 M30
```

钻孔子程序：

```
JZK.SPF；                                              钻孔子程序名
N1 DEF REAL RFP, DP, RT, SDIS；                        DEF 为定义，定义各变量的数据类型
N2 DEF REAL SPCA, SPCO, STAIO, DBH, FDISO；            REAL：实数，INT：整数
N3 DEF INT HNUM, LNUM, ZAEL=0；                        整数，用于计算行数
N4 DEF REAL HJ，LJ；                                   行间距、列间距
N5 G00 X=SPCA+10 Y=SPCO；
N6 MCALL CYCLE81 (RTP, RFP, SDIS, DP)；                调用钻孔指令
N7 MARKE1: HOLES1 (SPCA, SPCO, STA1, FDIS, LJ, LNUM)；
N8 SPCO=SPCO+ HJ；                                     计算下行的位置
N9 ZAEL=ZAEL+1；                                       计算加工行数
N10 IF ZAEL<HNUM GOTOB MARKE1；                        判断加工的行数是否到总行数
N11 MCALL；
N12 G90 G0 X=SPCA−10 Y=SPCO Z105；
N13 M17；
```

在数控加工过程中，有些加工工序，如钻孔、攻螺纹、镗孔、深孔钻削和切螺纹等，所需完成的动作循环十分典型，数控系统事先将这些循环用 G 代码进行定义，在加工时使用这类 G 代码，可大大简化编程工作量，本例是典型的固定循环功能在孔加工中的应用。

例 3：槽的固定循环加工

如图 2-50 所示，零件的表面均匀分布有两种不同的槽及四个孔，其中长方形槽为一个不完整的键槽，另外是六个圆弧槽，四个孔为通孔，试用 SINUMERIK 802S/C 系统编写加工程序。

1. 工艺分析

两种不同的槽及四个孔都是均匀分布的，只要编写一个槽的加工程序，利用坐标旋转功能就可以把其余的槽编制出来，孔的加工也是一样，槽和孔的加工程序均采用固定循环功能编写。为了提高效率，加工零件ϕ86mm 外形用较大直径的立铣刀，准备选用ϕ32mm 的立铣刀（T01）；加工长槽选用ϕ10mm（T02）的立铣刀，并用固定循环指令 LCYC75；加工圆弧槽选用ϕ36mm（T03）和ϕ40mm（T04）的斜镗刀，并用固定循环指令 LCYC61。为了提高孔的定位精度，所有的孔先用ϕ3mm 中心钻（T05）定出的孔位置，中心钻的长度补偿地址为 D01，然后再用ϕ20mm

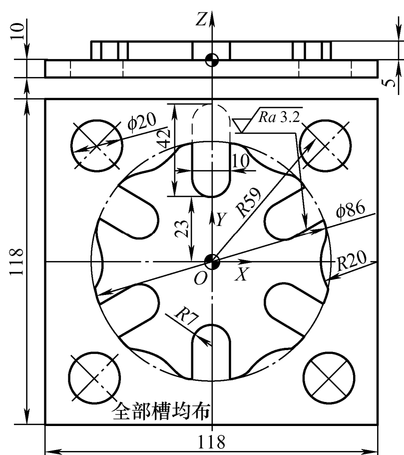


图 2-50　槽的固定循环加工（方案一）

钻头（T06）加工各孔。通过分析，制订出两种方案：一种方案是各槽单独编写、单独循环、单独加工；另一种方案是两种规格的槽合起来编写，再用循环指令加工，两种方案中的其他加工内容不变。

2．加工参数设定

1）假想第一个槽即原始槽，在第一象限的水平位置，参数设定见表 2-12。

表 2-12　LCYC75 铣槽加工循环参数

R101	退回平面（绝对平面 G90）	10	R120	凹槽拐角半径	7
R102	安全距离，无符号	2	R121	最大进给深度	3
R103	参考平面（绝对平面 G90）	5	R122	深度进给率	100
R104	凹槽深度（绝对坐标 G90）	0	R123	表面加工的进给率	150
R116	凹槽中心横坐标	23+7	R124	侧面加工的精加工余量	0.2
R117	凹槽中心纵坐标	0	R125	深度加工的精加工余量	0.2
R118	凹槽长度	42	R126	铣削方向：（G2 或 G3）	3
R119	凹槽宽度	14	R127	铣削类型：1 粗加工；2 精加工	1
精加工时，R121=0，R124=0，R125=0，R126=2，R127=2					

2）圆弧槽或ϕ20mm 孔的参数设定，见表 2-13。

表 2-13　LCYC61 加工圆弧槽及圆周分布孔参数

参　　数	含义，数值范围	圆　弧　槽	ϕ20mm 圆周分布孔
R115	钻孔或攻螺纹循环号 LCYC××	82	82
R116	分布圆弧中心横坐标（绝对坐标 G90）	0	0
R117	分布圆弧中心纵坐标（绝对坐标 G90）	0	0
R118	分布圆弧半径	59	59
R119	孔数	6	4
R120	起始角，数值范围：−180<R120<180	0	45
R121	角增量（均匀分布时为 0）	0	0

3）LCYC82 循环参数设定，见表 2-14。

表 2-14　LCYC82 循环参数

参　　数	含义及说明	加工圆弧槽	钻中心孔	钻ϕ20mm 孔
R101	退回平面，在此平面内，刀具不会碰撞	10	10	10
R102	安全距离，即距离加工表面的数值	2	2	2
R103	参考平面（绝对平面，待加工表面）	5	5	5
R104	最后钻深（绝对值）	0	3	10+5/tan59°≈13
R105	为了断屑，停留时间，单位为 s	0.5	0	0.5

3．加工程序

方案一：各槽单独编写、单独循环、单独加工

```
CAOXUNHUAG.MPF;                         槽的固定循环加工主程序名
N05 G90 G54 G00 Z100 X0 Y0;
N10 T01 D01;                            选用φ32mm 的立铣刀，加工零件φ86mm 外形
N15 F200 S800 M03;
N20 G00 Z10 X120 Y0;                    起刀点
N25 G01 Z0;                             下刀
```

```
N30 G41 X86 Y0；                                  完成刀具半径补偿并切入工件
N35 G02 X86 Y0 I=–43 J0；                         加工零件ϕ86mm 外形
N40 G40 X120 Y0；                                 取消刀补，回到起刀点
N45 G00 Z100 M05；                                抬刀
N50 T02 D02；                                     选用ϕ10mm 的立铣刀，加工长槽
N55 F200 S1000 M03；
N60 G00 Z10 X120 Y0；                             起刀点
N65 R101=10 R102=2 R103=5 R104=0；                给加工长槽参数赋值
N70 Rll6=40 R117=0 R118=34 R119=14；
N75 R120=7 R121=3 R122=100 R123=150；
N80 R124=0.2 R125=0.2 R126=2 R127=1；
N85 G258 RPL=30；                                 坐标系旋转至 30° 位置
N90 LCYC75；                                      调用 LCYC75 粗铣第一个长槽
N95 G258 RPL=90；                                 坐标系旋转至 90° 位置
N100 LCYC75；                                     调用 LCYC75 粗铣第二个长槽
N105 G258 RPL=150；                               坐标系旋转至 150° 位置
N110 LCYC75；                                     调用 LCYC75 粗铣第三个长槽
N115 G258 RPL=210；                               坐标系旋转至 210° 位置
N120 LCYC75；                                     调用 LCYC75 粗铣第四个长槽
N125 G258 RPL=270；                               坐标系旋转至 270° 位置
N130 LCYC75；                                     调用 LCYC75 粗铣第五个长槽
N135 G258 RPL=330；                               坐标系旋转至 330° 位置
N140 LCYC75；                                     调用 LCYC75 粗铣第六个长槽
N150 S1500；
N155 R121=0 R124=0 R125=0 R126=2 R127=2；         设定精铣槽循环参数，其他参数不变
N160 F130 S1300 M03；
N165 G258 RPL=30；                                坐标系旋转至 30° 位置
N170 LCYC75；                                     调用 LCYC75 粗铣第一个长槽
N175 G258 RPL=90；                                坐标系旋转至 90° 位置
N180 LCYC75；                                     调用 LCYC75 粗铣第二个长槽
N185 G258 RPL=150；                               坐标系旋转至 150° 位置
N190 LCYC75；                                     调用 LCYC75 粗铣第三个长槽
N195 G258 RPL=210；                               坐标系旋转至 210° 位置
N200 LCYC75；                                     调用 LCYC75 粗铣第四个长槽
N240 G258 RPL=270；                               坐标系旋转至 270° 位置
N245 LCYC75；                                     调用 LCYC75 粗铣第五个长槽
N250 G258 RPL=330；                               坐标系旋转至 330° 位置
N255 LCYC75；                                     调用 LCYC75 粗铣第六个长槽
N260 G00 Z100；                                   退刀
N265 T03 D03；                                    选用ϕ36mm 的斜镗刀加工圆弧槽
N270 F200 S1000 M03；
N275 R101=10 R102=2 R103=5；                      设定加工圆弧槽 LCYC82 循环参数
N280 R104=0 R105=0.5；
N285 R115=82 R116=0 R117=0 R118=59；              设定 LCYC61 循环参数
N290 Rll9=6 R120=0 R121=0；
N295 LCYC61；                                     调用 LCYC61 循环粗镗六个圆弧槽
N300 G00 Z100；                                   退刀
N305 T04 D04；                                    选用ϕ40mm 的斜镗刀加工圆弧槽
N310 F130 S1300 M03；
N315 LCYC61；                                     调用 LCYC61 循环精镗六个圆弧槽
N320 G00 Z100；                                   退刀
```

```
N325 T05 D05;                              选用φ3mm 中心钻
N330 F80 S1500 M03;
N335 G00 X0 Y0 Z30;                        快速引刀接近工件
N340 R101=10 R102=2 R103=5;                设定 LCYC82 循环参数
N345 R104=3 R105=0;
N350 R115=82 R116=0 R117=0 R118=59;        设定 LCYC61 循环参数
N355 R119=4 R120=45 R121=0;
N360 LCYC61;                               调用 LCYC61 循环钻φ3mm 中心孔
N365 G00 Z100;                             退刀
N370 T06 D06;                              选用φ20mm 钻头
N375 F80 S1500 M03;
N380 G00 X0 Y0 Z30;                        刀具快速接近工件
N385 R101=10 R102=2 R103=5;                设定 LCYC82 循环参数
N390 R104=15 R105=0.5;                     钻φ3mm 孔，深度大于 13mm，取 15mm
N395 R115=82 R116=0 R117=0 R118=59;        设定 LCYC61 循环参数
N400 R119=4 R120=45 R121=0;
N405 LCYC61;                               调用 LCYC61 循环钻φ3mm 中心孔
N410 G00 Z100 M09;                         退刀
N415 M30
```

点　评

钻通孔时，钻尖要全部钻出工件，计算方法是：通孔深度+钻头半径×cot（118°/2）钻尖才能完全钻出工件，118°为钻头钻尖角度。

方案二：两种规格的槽合起来编写，再用循环指令加工（外形φ86mm、φ20mm 孔略）

如图 2-51 所示，长槽与圆弧槽两槽组合起来编程，图中的 1 点–2 点–3 点–4 点–5 点–6 点则是两槽合起来的轮廓，然后按坐标原点为旋转点进行旋转就可以加工外形轮廓，这时只能选用直径小于直槽宽度的铣刀，现选用φ12mm 的立铣刀，程序如下：

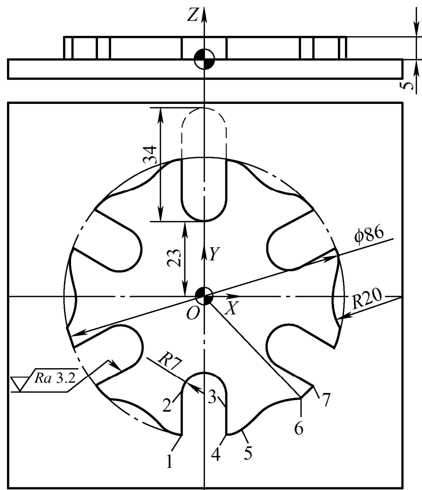


图 2-51　槽的固定循环加工（方案二）

两槽组合加工子程序：

```
HEBIAN.SPF；                          组合槽子程序名
N05 G01 X−7 Y−30；                    坐标旋转 0°，X 轴处于水平位置
N10 G02 X7 Y−30 CR=7；
N15 G01 X7 Y−42.43；
N20 G03 X12 Y−41.26 CR=43；
N25 G02 X29.77 Y−31.03 CR=20；
N30 G03 X33.24 Y−27.26 CR=43；
N35 M17；
```

合编槽加工主程序：

```
HEBIANCAO.MPF；                       合编槽程序名
N05 G90 G54 G00 Z100 X0 Y0；
N10 T07 D07；                         选用φ12mm 的立铣刀
N15 F100 S800 M03；
N20 G00 Z20 X0 Y−120 ；               起刀点
N25 G01 Z0；                          下刀
N30 G41 D02 X−7 Y−42.43；             完成刀具半径补偿并切入工件
N35 HEBIAN；                          调用合编子程序（X 轴处于 0°的位置）
N40 ROT RPL=60；                      坐标系旋转至 60°位置（X 轴处于 60°位置）
N45 HEBIAN；                          调用合编子程序（802D、840D）
N50 ROT RPL=120；                     坐标系旋转至 120°位置
N55 HEBIAN；                          调用合编子程序
N60 ROT RPL=60；                      坐标系旋转至 180°位置
N65 HEBIAN；                          调用合编子程序
N70 ROT RPL=60；                      坐标系旋转至 240°位置
N75 HEBIAN；                          调用合编子程序
N80 ROT RPL=60；                      坐标系旋转至 300°位置
N85 HEBIAN；                          调用合编子程序
N90 G03 X0 Y−43 CR=43；               圆弧出刀
N100 Z20 M05；                        抬刀
M105 G00 D00 X0 Y−120；               D00 取消刀补并回到起刀点
N110 M30；
```

第 3 章　FANUC 数控编程

3.1　车削基础编程

相关知识点

1）在一个程序段中，根据图样上标注的尺寸，采用手工编程时，可以采用绝对值编程、增量值编程或两者混合编程。如果采用自动编程软件编程，一般采用绝对值编程。

2）由于被加工零件的径向尺寸在图样上的标注和测量通常都采用直径表示，所以用绝对值编程时，*X* 值以直径值表示；用增量值编程时，以径向实际位移量的两倍值表示，并附加方向符号。

3）一般回转体零件，其径向尺寸精度要求都比轴向尺寸精度要高，为提高零件的径向尺寸精度，*X* 向的脉冲当量取 *Z* 向的一半。

4）由于车削加工常用棒料或锻料作为毛坯，加工余量较大，以及加工螺纹时要分多刀进行，所以为简化编程，数控装置具备不同形式的固定循环，以便在粗加工时可进行多次重复循环切削。

5）数控车床大多数是以车刀上的某一点作为基准来编程的，而实际上有时为提高刀具寿命和零件表面质量，需在车刀的刀尖处磨出一个小圆弧（涂层刀片在刀尖处同样存在一段小圆弧，根据刀具规格，一般在 0.2～2.0mm 之间），为防止产生过切或少切，数控装置一般都具有刀尖圆弧半径自动补偿功能，这类数控车床可直接按照工件轮廓编程，使程序编制简单、零件尺寸准确。

例 1：简单直母线回转零件的车削程序

图 3-1 所示零件的材质为 Q235，毛坯尺寸为 45mm×25mm，加工工序包括粗、精车端面、外圆及倒角、倒圆。零件加工的单边余量为 2mm，其左端面 25mm 为夹紧用。

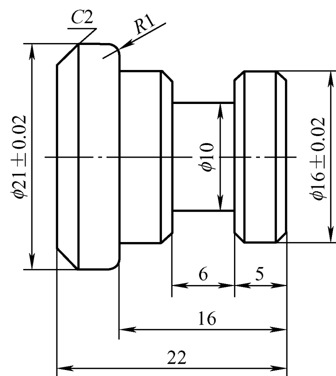


图 3-1　简单直母线回转零件

1. 加工工艺

1）用自定心卡盘装夹练习坯件，伸出长度为：限位位置尺寸+切断刀宽+工件长度，即（10+8+22）mm=40mm。

2）选择两把高速钢刀：一把外圆车刀（T0100），一把切断刀（T0200，刀宽 3mm）。

3）选择试切对刀的方法对刀及检查。

4）调整车床主轴转速及进给量：粗车 265r/min，F60；精车 400r/min，F30。

5）外圆选用外圆车削循环（G90）的车削方法加工，切槽选用端面切削循环（G94）的车削方法加工，倒角 *C*1 选用直线插补（G01）的车削方法加工，圆角 *R*1 选用圆弧插补（G02）的方法车削加工。

6）编写程序。

7）检查程序（空运行检查参数，翻页检查数字，仿真检查进给路线）。

8）切削加工。

9）加工完毕，测量、检查各部分尺寸并交验。

2．编写程序

%O203；	
N05 M06 T0101；	外圆车刀
N10 G50 X60 Z60；	
N20 M03 S2 T0100；	
N30 G00 X26 Z2；	
N40 G90 X23 Z−25 F80；	外圆车削循环（G90）
N50 X21.2；	粗车外圆 ϕ21mm×22mm
N60 X18 Z−16；	
N70 X16.2；	粗车外圆ϕ21mm×22mm
N80 G00 X60 Z60；	
N90 M06 T0202；	选取切槽刀（加工ϕ10mm×6mm）
N100 G00 X18 Z−8；	
N110 G94 X10 Z−8 F50；	切槽选用端面切削循环（G94）
N120 Z−11 F30；	
N130 G94 X14 Z−8 R2；	
N140 G01 X18 Z−1l F100；	
N150 G94 X14 Z−1l R−2 F30；	
N160 G00 X60 Z60；	
N170 T0100；	
N180 G00 X14 Z2；	
N190 G0l X14 Z0 F100；	
N195 X16 Z−1 F30；	倒角 C1
N200 Z−16；	加工ϕ16mm 外圆
N210 X19；	
N220 G03 X21 Z−17 R1；	倒圆 R1
N230 G01 Z−2l；	加工ϕ21mm 外圆
N240 G00 X60 Z60；	
N250 T0202；	
N260 G00 X23 Z−25.5；	
N270 G94 X10 Z−25.5 F50；	切断工件
N280 G01 X23 Z−22 F100；	
N290 X17 Z−25 F30；	
N300 X0 Z−25；	
N310 G00 X23 Z−25；	
N320 X60 Z60；	
N330 M05 T0100；	
N340 M30；	

相关知识点

1．轴向粗车复合循环（G71）

轴向粗车复合固定循环指令主要用于轴向加工余量较大而径向加工余量较小的情况，而

且 FANUC 0i 数控系统的车削加工中，轴向粗车复合固定循环指令 G71 可以根据加工零件的轮廓，分别采用两种不同类型的粗车加工循环方式，即类型Ⅰ和类型Ⅱ。

（1）类型Ⅰ　该指令适用于采用圆柱棒料为毛坯，需多次进给才能完成粗加工的阶梯轴零件的外圆或内孔的加工。其加工外圆轮廓的刀具循环路径如图 3-2a 所示。

G71 的指令格式为：

G00 X_ Z_；
G71 U（Δ*d*）R（*e*）；
G71 P（*ns*）Q（*nf*）U（Δ*u*）W（Δ*w*）F（*f*）S（*s*）T（*t*）
N（*ns*）G00/G01 …；
…F（*f*）S（*s*）；
…；
N（*nf*）…；

该指令中各项的含义如下：

X、Z——循环起始点的坐标，该点一定在毛坯之外且靠近毛坯。

Δ*d* ——背吃刀量（通常为半径值且不带符号），该值也可以由系统参数 5132 号设定，参数由程序指令改变。

e——退刀量，该值也可以由系统参数 5133 号设定，参数由程序指令改变。

ns——精加工轮廓程序段中开始段的段号。

nf ——精加工轮廓程序段中结束段的段号。

Δ*u*——*X* 轴方向的精加工余量和方向（通常为直径值，也可以指定为半径值）。

Δ*w*——*Z* 轴方向的精加工余量和方向。

f、*s*、*t*—— G71 程序段中的 F、S、T 是粗加工时的进给量、主轴转速及所用刀具，而包含在 *ns* 和 *nf* 程序段中的 F、S、T 是精加工时的进给量、主轴转速及所用刀具。这些参数也可以在循环之前指定。

（2）类型Ⅱ　由于类型Ⅰ加工的零件轮廓必须符合 *X* 轴、*Z* 轴方向同时单调增大或单调减小，对一些带有凹、凸变化的轮廓，类型Ⅰ的循环就不适合了。FANUC 0i 数控系统提供了类型Ⅱ的粗加工循环方式，类型Ⅱ不同于类型Ⅰ的地方就是沿 *X* 轴的外形轮廓不必单调增大或单调减小，而且最多可以允许有 10 个凹槽的粗加工，但沿 *Z* 轴的外形轮廓必须单调增大或单调减小，如图 3-2b 所示。

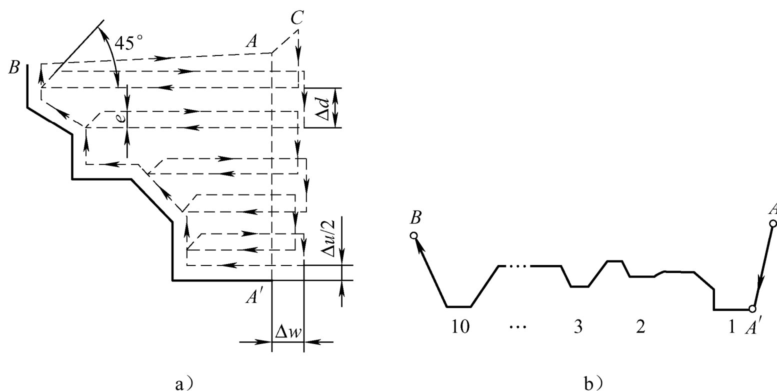


图 3-2　类型Ⅱ粗车的轮廓凹槽

FANUC 0i 数控系统轴向粗车复合固定循环类型Ⅰ和类型Ⅱ的主要区别：

1）类型Ⅰ加工的零件轮廓必须符合 *X* 轴、*Z* 轴方向同时单调增大或单调减小；类型Ⅱ沿 *Z* 轴的外形轮廓必须单调增大或单调减小，而沿 *X* 轴的外形轮廓允许有增有减，只要凹槽数目不大于 10 个即可。

2）类型Ⅰ的精加工轮廓定义的第一个程序段只指定一根轴移动（*X* 轴）；类型Ⅱ的精加工轮廓定义的第一个程序段指定两根轴移动（*X* 轴和 *Z* 轴），即使不包含 *Z* 轴移动，也必须指定 W0。两者的编程格式比较如下：

类型Ⅰ的编程格式：

G00 X100.0 Z50.0；
G71 U5.0 R1.0；
G71 P10 Q20 U0.6 W0.3 F0.2 S1200；
N10 G00/G01 X30.0 （或 U−70.0）；　　　只指定 *X* 一根轴
… F0.1 S1800；
…；
N20 …；

类型Ⅱ的编程格式：

G00 X100.0 Z50.0；
G71 U5.0 R1.0；
G71 P10 Q20 U0.6 W0.3 F0.2 S1200；
N10 G00/G01 X30.0 Z5.0（或 U−70.0 W−45.0）　必须指定 *X* 和 *Z* 两根轴
或者 N10 G00/G01 X30.0 Z50.0（或 U−70.0 W0 或 X30.0 W0）；
… F0.1 S1800；
…；
N20…；

类型Ⅰ加工的零件轮廓必须符合 *X* 轴、*Z* 轴方向同时单调增大或单调减小，对一些带有凹、凸变化的轮廓，类型Ⅰ就不适合了。FANUC 0i 数控系统提供了类型Ⅱ的粗加工循环方式，类型Ⅱ不同于类型Ⅰ的地方就是沿 *X* 轴的外形轮廓不必单调增大或单调减小，而且最多允许有 10 个凹槽的粗加工，且沿 *Z* 轴的外形轮廓必须单调增大或单调减小。

2. 仿形粗车复合循环（G73）

该指令适合于零件毛坯已基本成形，*X* 轴向与 *Z* 轴向余量比较均匀的铸件或锻件的加工，格式为：

G73 U（Δi） W（Δk） R（d）；

G73 P（ns） Q（nf） U（Δu）W（Δw） F（f） S（s） T（t）；

其中：

Δi——*X* 轴方向的退刀量（半径值）。

Δk ——*Z* 轴方向的退刀量。

d——粗加工切削次数。

第二行指令的格式及含义与 G71 完全相同。

说明：

1）Δi、Δk 为第一次车削时退离零件轮廓的距离，确定该值时应以毛坯的粗加工余量大小来计算，可按下列公式确定

$$\Delta i（X\text{轴方向的退刀量}）=X\text{轴粗加工余量}-\text{每一次背吃刀量}$$

Δk（Z轴方向的退刀量）=Z轴粗加工余量−每一次背吃刀量

2）G73 循环的进给路线与零件的轮廓形状是相同的，所以它对零件轮廓的单调性是没有要求的。

3）G73 完成的也是零件的粗加工，精加工同样采用 G70 完成。

例 2：外轮廓圆弧回转件的车削程序

加工图 3-3 所示的零件。毛坯为ϕ65mm×150mm 的棒料，材料为 45 钢。

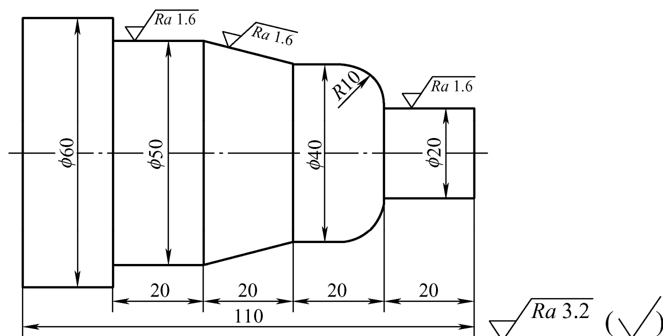


图 3-3　外轮廓圆弧零件

1. 工艺分析

毛坯为ϕ65mm×150mm 的棒料，毛坯长度有 40mm 的加工余量，可采用一次装夹，完成全部加工，具体是：先车平一端端面，钻中心孔，采用一夹一顶的方法，保证车削长度大于 110mm，将工件的所有尺寸车出，最后切断。

整个零件表面的加工，采用复合循环完成。该零件轴向粗、精车循环进给路线如图 3-4 所示。其中，精加工轮廓定义是 $S \rightarrow A \rightarrow A' \rightarrow B \rightarrow A$，程序起点 S（100，50），循环起点 A（65，5）；虚线是快速定位路径，实线是切削路径。

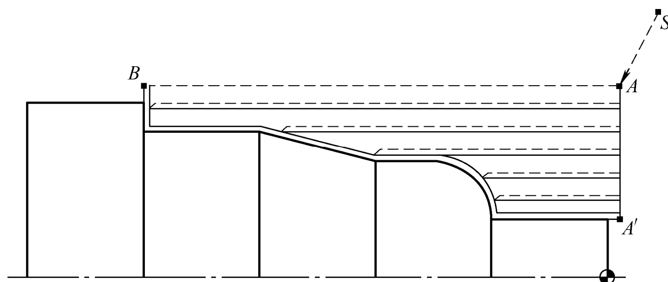


图 3-4　轴向粗、精车循环进给路线

2. 编制程序

程序如下：

```
%O322;
N05 G90 G54 G00 X100.0 Z150.0 T0100;    程序初始化
N10 M06 T0101;                          选刀
N15 G97 S1000 M03;
N20 G00 X65.0 Z3.0;
N25 G71 U3.0 R1.0;
```

```
N30 G71 P35 Q65 U0.4 W0.2 F0.2;        循环编程
N35 G00 X20.0;                         循环开始
N40 G01 G42 Z-20.0 F0.1;
N45 G03 X40.0 Z-30.0 R10.0;
N50 G01 Z-40.0;
N55 G01 X50.0 Z-60.0;
N60 G01 Z-80.0;
N65 G01 X65.0;                         循环结束
N70 G00 X100.0 Z150.0 T0100;
N75 T0202;                             换刀
N80 G96 S180;
N85 G00 X65.0 Z3.0 M03;
N90 G70 P35 Q65;                       精加工循环
N95 G00 X100.0 Z150.0 T0200;
N100 M30;
```

例3：多段直线与圆弧母线回转件车削

图3-5所示为多段直线与圆弧母线回转件，其材质为40CrMoV，毛坯为ϕ120mm×350mm的锻件，调质处理至200～260HBW。试分析零件的加工工艺并编写数控加工程序。

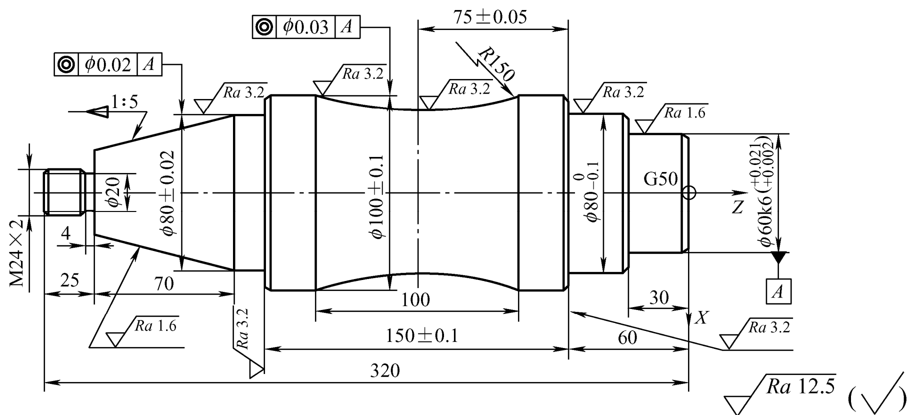


图3-5 多段直线与圆弧母线回转件

1. 工艺分析

根据零件轮廓情况及尺寸要求，零件不能一次装夹完成全部加工，必须进行两次装夹，工艺过程如下：

（1）首先将零件全部粗加工 由于毛坯经调质处理，粗加工时应留半精加工余量，直径留余量5mm，端面留余量3mm。此加工也可安排在卧式车床上完成。

（2）加工零件的左端 精加工零件的左端ϕ60mm、ϕ80mm、ϕ100mm和R150mm等尺寸。采用“一夹一顶”的装夹方式，夹左端ϕ80mm外圆顶右端，必要时，在两端适当位置车削工艺找正带，右端架中心架，车平右端面，修中心孔B3.15/10，再用顶尖定位，工件坐标系及坐标原点设定如图3-5所示。

（3）右端精加工后，零件调头装夹，精加工左端 用卡盘夹右端ϕ 80mm 外圆处（垫铜皮，以免伤表面），顶左端，按已加工面，打表找正工件ϕ100mm外圆，径向圆跳动量应不大于0.03mm。必要时在工艺找正带上架中心架，然后车平端面，修左端中心孔为B3.15/10，再

以顶尖定位，复查ϕ100mm 外圆的径向圆跳动量。

对刀后用程序加工 M24×2、ϕ20mm、ϕ80mm 锥度和外圆至图样要求，特别注意测量尺寸（150±0.1）mm，应保证合格。

2. 刀具选择

（1）刀具材料的选择　由于工件材料为 40CrMoV，属于中碳合金钢，调质后的强度和韧性较好。所以应选择 YT30，适当增大前角和后角，这样才能达到零件的精加工要求。

（2）刀具种类　加工右端时 R150mm 圆弧要采用 93°偏头（仿形）外圆车刀，以避免加工圆弧时产生干涉。加工左端时，采用 93°外圆车刀加工锥面和外圆，采用 60°螺纹车刀车 M24×2 螺纹。常用米制螺纹切削的进给次数与背吃刀量见表 1-7。

3. 数控加工程序

1）加工右端各外圆时，用 G73 循环进行半精加工，再用 G70 循环进行精加工。程序如下：

%O743；	主程序
N10 G50 X100 Z100；	建立工件坐标系和换刀点
N20 M03 S900；	
N30 T01 01；	调用 93°偏头外圆车刀
N40 G00 X110 Z3；	建立循环起点
N50 G73 U2.5 W2 R0.02；	用 G73 循环进行半精加工
N60 G73 P70 Q180 U0.5 W0.2 F100；	
N70 G00 X56；	快速到达端面前 3mm 处
N90 X59.95 Z-2；	倒角 C2
N100 Z-30；	车ϕ60mm 外圆
N110 X76；	车端面
N120 X79.995 W-2；	倒角 C2
N130 Z-60；	车ϕ80mm 外圆
N140 X96；	
N150 X100 W-2；	倒角 C2
N160 Z-65；	
N170 G02 X100 W-100 R150.05；	车 R150mm 圆弧
N180 G01 Z-215；	多切 5mm，G73 结束段
N190 G70 P70 Q180；	精车循环车右端各外圆
N200 G00 X100 Z100；	刀具回换刀点
N210 M05；	主轴停
N220 M30；	程序结束

2）工件调头加工左端锥面。程序如下：

%O746；	加工左端主程序
N10 G50 X100 Z100；	建立工件编程坐标系和换刀点
N20 M03 S920；	
N30 T0101；	调用 90°外圆车刀
N40 G00 X105 Z3；	建立循环起点
N50 G70 U2 R1；	采用 G71 切削循环进行半精加工
N60 G71 P70 Q140 U1 W0.5 F100；	
N70 G00 X20；	快速接近倒角处
N80 G01 Z0 F80；	进给接近端面
N90 X23.85 Z-2；	倒角，螺纹外径减小 0.15mm
N100 Z-25；	车螺纹外径
N110 X68；	车锥度小端的端面

N120 X80.01 Z-95；	车锥面
N130 W-15；	车ϕ80mm 外圆
N140 X102；	车端面
N150 G70 P70 Q140；	精加工循环
N160 G00 X96 Z-105；	
N170 G01 Z-110 F100；	
N180 X100 W-2；	倒角 *C*2
N190 G00 X100 Z100；	回到换刀点
N200 T0202；	调用切槽刀，*B*=4mm，右刀尖对刀
N210 G00 X70 Z-21；	因右刀尖对刀，故减去 4mm
N220 G01 X20 F30；	切槽
N230 G04 X1.0；	在槽底暂停 1s
N240 G00 X100；	切槽刀退出
N250 Z100；	返回到换刀点
N260 T0303；	调用 60° 螺纹车刀
N270 G00 X30 Z4；	建立循环起点
N280 G92 X23.5 Z-23 F2；	第 1 次螺纹加工循环
N290 X23；	第 2 次螺纹加工循环
N300 X22.5；	第 3 次螺纹加工循环
N310 X22；	第 4 次螺纹加工循环
N320 X21.835；	第 5 次螺纹加工循环
N330 G00 X100 Z100；	返回到换刀点
N340 M05；	主轴停止
N350 M30；	程序结束，光标返回程序开头

点　评

1）审图是工艺分析与程序编制之前的必要步骤，应从如下几个方面进行：

① 检查零件图的完整性和正确性，零件视图是否正确、足够，几何元素的给定条件是否充分，表达是否直观、清楚，绘制是否符合国家标准。

② 分析加工精度、技术要求及定位基准。

2）工艺分析应从如下几个方面进行：

① 检查各要素的形状是否简单，加工面积是否小，规格标准是否统一。

② 检查刀具是否容易进入，退出和顺利通过加工表面。

3.2　车削复合循环编程

例 1：活塞套车削程序

图 3-6 所示为活塞缸盖，其毛坯尺寸为ϕ120mm×150mm，该零件采用数控车床加工。设左端长 51mm 的外圆部分已由上道工序加工完成，现为装夹定位端。本次装夹好后，先后完成外形、内孔和槽等部位的车削加工。

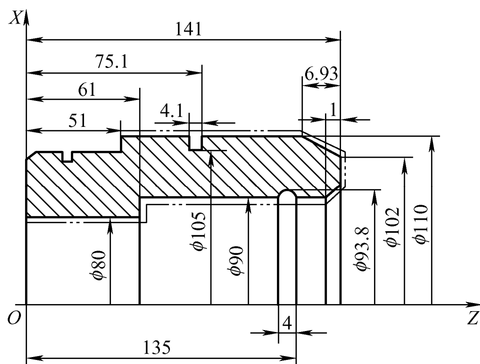


图 3-6　活塞缸盖

1. 加工工艺分析

工件一次装夹，夹毛坯，加工工艺路线是：

1）采用工件的左端面和毛坯外圆作为粗基准，使用普通自定心卡盘夹紧工件，先车出端面，并以此面的中心为原点建立工件坐标系。

2）确定数控加工刀具，根据零件的加工要求，选用外圆粗车刀、外圆精车刀、内孔车刀、切槽刀、切断刀等。

3）零件的数控加工工艺步骤：

① 车右端面（主轴转速 500r/min，进给量 0.15mm/r）。

② 自右向左粗车外轮廓（主轴转速 500r/min，进给量 0.15mm/r）。

③ 自右向左精车外轮廓（主轴转速 1000r/min，进给量 0.08mm/r）。

④ 用内圆车削循环（G90）粗车内孔，再用切槽循环（G75）切内槽，最后用直线插补（G01）进行精车。

⑤ 粗车内孔，主轴转速为 265r/min；精车内孔，主轴转速为 400r/min。

⑥ 切槽，用切槽刀 T0404，刀宽 3mm，主轴转速为 300r/min。

⑦ 切断。

2. 编写程序

程序如下：

%O2021；	主程序号
N05 G92 X150.0 Z200.0 T0101；	建立工件坐标系，进行刀具补偿
N10 S300 M03；	主轴正转，转速为 300r/min
N15 G90 G00 X118.0 Z141.5；	快进到 X=118，Z=141.5
N20 G01 X82.0 F0.3；	粗车端面，进给速度为 0.3mm/r
N25 G00 X103.0；	快退至 X=103
N30 G01 X110.5 Z135.0 F0.2；	粗车短锥面，速度为 0.2mm/r
N35 Z48.0 F0.3；	Z 向进给至 Z=48
N40 G00 X150.0 Z200.0 T0100；	粗车ϕ110mm 的外圆并返回起刀点
N45 T0303；	自动换刀，并进行刀具补偿
N50 G00 X89.5 Z180.0；	快进至 X=89.5，Z=180
N55 Z145.0；	Z 向快进至 Z=145
N60 G01 Z61.5 F0.3；	粗车 ϕ90mm 的孔
N65 X79.5；	粗车内孔阶梯面
N70 Z-5.0；	粗车 ϕ80mm 的孔
N75 G00 X75.0；	X 向快退至 X=75
N80 Z180.0；	Z 向快退至 Z=180
N85 G00 X150.0 Z200.0 T0300；	返回起刀点，取消刀补（或用 G28）
N90 T0505；	自动换刀，并进行刀具补偿（或用 M00）
N95 S600 M03；	主轴正转，转速为 600mm/r
N100 G00 X85.0 Z145.0；	快进至 X=85，Z=145
N105 G01 Z141.0 F0.5；	Z 向工进至 Z=141
N110 X102.0 F0.2；	X 向走到 X=102，精车端面
N115 G91 X8.0 Z-6.93；	精车短锥面
N120 G90 G00 Z48.0 F0.08；	精车 ϕ110mm 的外圆（绝对坐标）
N125 G00 X112.0；	X 向快退至 X=112
N130 X150.0 Z200.0 T0500；	返回起刀点，取消刀补（或用 G28）
N135 T0707；	自动换刀，并进行刀具补偿（或用 M00）
N140 S200 M03；	主轴正转，转速为 200mm/r
N145 G00 X85.0 Z180.0；	快进至 X=85，Z=180

N150 Z131.0 M08；	*Z* 向快进至 *Z*=131，打开切削液
N155 G01 X93.8 F0.2；	车 *X*=93.8 处的槽，刀头为弧形，和槽形一致
N160 G00 X85.0；	*X* 向快退至 *X*=85
N165 Z180.0；	*Z* 向快退至 *Z*=180
N170 X150.0 Z200.0 T0700 M09；	返回起刀点，取消刀补
N175 T0909；	自动换刀，并进行刀具补偿（或用 M00）
N180 S600 M03；	主轴正转，转速为 600mm/r
N185 G00 X94.0 Z180.0；	快进至 *X*=94，*Z*=180
N190 Z142.0；	*Z* 向快进至 *Z*=142
N195 G01 X90.0 Z140.0 F0.2；	工进至 *X*=90，*Z*=140（内孔倒角）
N200 Z61.0；	*Z* 向工进至 *Z*=61（精车 ϕ90mm 的内孔）
N205 X80.2；	*X* 向工进至 *X*=80.2（精车内孔阶梯面）
N210 Z-5.0；	*Z* 向工进至 *Z*= −5（精车 ϕ80mm 的内孔）
N215 G00 X75.0；	*X* 向快退至 *X*=75
N220 Z180.0；	*Z* 向快退至 *Z*=180
N225 X150.0 Z200.0 T0900；	返回起刀点，取消刀补（或用 G28）
N230 T1111；	自动换刀，并进行刀具补偿（或用 M00）
N235 S240 M03；	主轴正转，转速为 240mm/r
N240 G00 X115.0 Z71.0；	快进至 *X*=115，*Z*=71
N245 G01 X105.0 F0.1M08；	切 4.1mm×2.5mm 的槽，开切削液
N250 X115.0；	车 ϕ80mm 的孔
N255 G00 X150.0 Z200.0 T1100 M09；	返回起刀点，取消刀补
N260 M05 M30；	程序结束

点　评

车内孔有许多困难，下面几点应当注意

1）内孔车刀的刀尖应尽量与车床主轴的轴线等高。

2）刀杆的粗细应根据孔径的大小来选择，刀杆粗会碰孔壁，刀杆细则刚性差，刀杆应在不碰孔壁的前提下尽量大些为宜。

3）刀杆伸出刀架的距离应尽可能短些，以改善刀杆刚性，减小切削过程中可能产生的振动。

4）车内孔的切削用量要比车外圆时适当减小些，特别是车小孔或深孔时，其切削用量应更小。切削用量的选择：切削时，由于镗刀刀尖先切入工件，因此其受力较大，再加上刀尖本身强度低，所以容易碎裂，其次由于刀杆细长，在切削力的影响下，吃刀深了，容易弯曲振动。

例 2：手柄的仿形加工

图 3-7 所示零件的毛坯尺寸为 ϕ32mm×100mm，试编写加工工艺及加工程序。

加工工艺分析：根据该零件外轮廓的特点，应先加工左端面和外圆，再加工右端外轮廓。由于右端外轮廓不具有单调性，所以只能用 C73 进行仿形循环加工。选用可转位硬质合金刀片，刀具及其有关参数见表 3-1，加工工序卡见表 3-2。

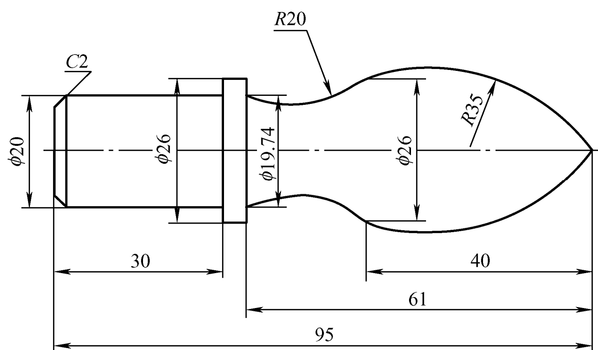


图 3-7　简单圆弧母线回转零件的车削

表 3-1　刀具及其有关参数

序　号	刀　具　号	刀具名称及规格	加 工 表 面	刀 尖 半 径
1	T01	45°YT 端面车刀	端面	0.8mm
2	T02	90°YT 外圆车刀	各外轮廓	0.8mm

1．加工左端

1）采用自定心卡盘夹紧毛坯右端外圆，伸出 40mm，手动车平零件左端面。

2）工件坐标系设定在工件已车端面的轴心上，用 G71 外圆粗车循环指令加工外轮廓，用 G70 进行精加工。T02 刀具偏置值设在第 2 组刀具偏置中。选用可转位硬质合金刀片。

表 3-2　加工工序卡

工　步	工 步 内 容	刀　具　号	刀具规格/（mm×mm）	切削速度/（m/min）	进给量/（mm/r）	背吃刀量/mm
1	车零件左端面	T01	20×20	80	0.1	1
2	粗车左端外轮廓	T02	20×20	80	0.25	2
3	精车左外轮廓	T02	20×20	120	0.08	0.08
4	车零件右端面	T01	20×20	80	0.1	1
5	粗车右外轮廓	T02	20×20	80	0.25	2
6	精车外轮廓	T02	20×20	120	0.08	0.8

程序如下：

```
%O301;                              加工左端程序名
N05 G54 G21 G99 G40;                建立初始状态:
N10 M03 G96 S80 T0202;              主轴正转，恒切削速度为 80mm/min，
N15 G50 S2000;                      限最高转速为 2000r/min
N20 G00 X35 Z2 M08;                 刀具快速移到循环起点（35，2），切削液开
N25 G71 U2 R1;                      外圆粗车循环：背吃刀量为 2mm，退刀量为 1mm
N30 G71 P4O Q70 U0.8 W0.5 F0.25;    X 向精加工余量为 0.8mm，Z 向为 0.5mm，
N40 G01 X15;                        循环开始，刀具移至点（15，2）
N45 Z0;                             刀具移至点（15，0）
N50 X20.0 C2.0 F0.08;               精加工进给量为 0.08mm/r，自动倒角
N55 Z-30;
N60 X26;
N65 Z-6;
N70 X35;                            循环结束，刀具返回循环起点
N75 S120;                           精加工切削速度为 120m/min
N80 G70 P40 Q70;                    精加工循环
N85 G00 X100 Z100 M09;              刀具快速移到点（100，100）
N90 M30;                            程序停止并返回开始处
```

2．加工右端

1）采用自定心卡盘夹工件左端外圆ϕ20mm 处，ϕ26mm 左端面定位。

2）工件坐标系设定在工件已车右端面的轴心上，用 G73 仿形循环指令粗加工外轮廓。

程序如下：

```
%O34;                               加工右端程序名
```

N05 G54 G21 G99 G40；	建立初始状态
N10 M03 G96 S80 T0202；	主轴正传，恒切削速度为 80m/min
N15 G50 S2000；	限最高转速为 2000r/min
N20 G00 X38 Z3 M08；	刀具快速移到循环起点（38，3），切削液开
N25 G73 U19 R12；	仿形粗车加工循环：*X* 向总是退刀 92mm，重复 12 次
N30 G71 P40 Q60 U0.8 W0.5 F0.25；	*X* 向精加工余量为 0.8mm，*Z* 向为 0.5mm
N35 G73 P40 Q60 U0.8 F0.25；	*X* 向精加工余量为 0.8mm，轴向为 0
N40 G00 X0；	循环开始程序段 N40，刀具快速定位到点（0，3）
N45 G01 Z0 F0.08；	刀具从点（0，3）移到点（0，0），精加工速度为 0.08mm/r
N50 G03 X26 Z-40 R35；	
N55 G02 X19.74 Z-61 R20；	
N60 G01 X35；	循环结束程序段 N60，刀具返回循环起点
N65 M03 G96 S120 T0202；	切削速度为 120m/min
N70 G70 P40 Q60；	精加工循环
N75 G00 X100 Z100 M09；	刀具快速移到点（100，100），切削液停
N80 M30；	程序停止并返回开始处

例 3：传动轴加工

编制图 3-8 所示零件的加工程序。要求先粗加工，后精加工，粗车后留 0.2mm 余量（单边），背吃刀量为 2mm。

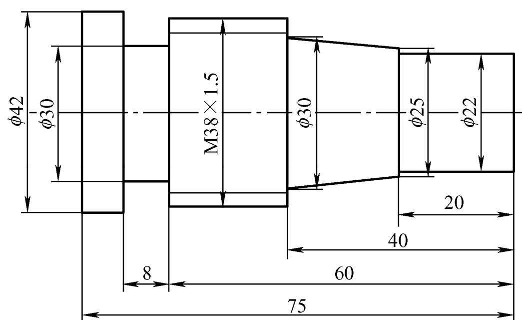


图 3-8　简单圆弧母线回转零件的车削

1．相关计算

加工 M38×1.5 螺纹共切削 5 刀，每刀数据如下：

第一刀：38mm−0.8mm=37.2mm

第二刀：37.2mm−0.6mm=36.6mm

第三刀：36.6mm−0.4mm=36.2mm

第四刀：36.2mm−0.16mm=36.04mm

2．编写程序

根据题意编程如下：

N10 G50 X200.0 Z200.0；	定零点
N20 G97 S600 M03 T0101；	
N30 G00 X42.50 Z10.0；	
N50 G71 U2.0 R0.1；	外圆粗车循环
N60 G71 P70 Q140 U0.4 W0.2 P0.3；	*X* 向精加工余量为 0.4mm，*Z* 向为 0.2mm
N70 G00 X0 Z2.0；	循环开始

N80 G01 Z0 F0.15 S150 M09；	
N90 X22.0；	
N100 Z-20.0；	
N110 X30.0 Z-40.0	
N120 X37.7；	
N130 Z-68.0；	
N140 X42.5；	循环结束
N150 G70 P70 Q140；	外圆粗车循环
N160 G00 X200.0 Z200.0 T0100 M09；	
N170 T0202；	换切槽刀，刀宽 4mm，右刀尖对刀
N180 G00 X42.5 Z-68.0；	
N190 G01 X34.0 M08；	
N200 Z-64.0；	
N210 X30.0；	切槽
N220 Z-68.0；	
N230 G00 X200.0；	
N240 Z200.0 T0200 M09；	
N250 T0303；	换 60°螺纹车刀
N260 G00 X37.7 Z-38.0；	
N270 G32 X37.2 Z-62.0 I3.0 M08；	螺纹加工循环
N280 X36.6；	
N290 X36.2；	
N300 X36.04；	螺纹加工结束
N310 G00 X200.0 Z200.0 300 M09；	
N320 M30；	

3.3　螺纹加工

相关知识点

螺纹切削循环 G92 为简单螺纹循环，使用该指令可以切削锥螺纹和圆柱螺纹，其循环路径与前述的单一形状固定循环基本相同，只是 F 后续进给量改为螺距值。其指令格式为：

G92 X（U）_Z（W）_ R_ F_；

图 3-9 所示为 G92 螺纹切削循环图。刀具从循环起点 *A* 开始，按 1→2→3→4 路径进行自动循环。图中虚线表示刀具快速移动，细实线表示按 F 指定的进给移动。X、Z 为螺纹终点的（*C* 点）的坐标值；U、W 为起点坐标到终点坐标的增量值；R 为锥螺纹终点半径与起点半径的差值，R 值正负判断方法与 G90 相同，圆柱螺纹 R=0 时，可以省略；F 为螺距值。螺纹切削退刀角度为 45°。

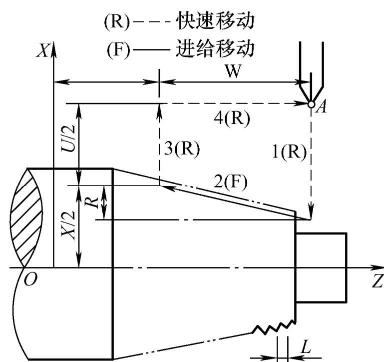


图 3-9　G92 螺纹切削循环图

例 1：圆柱直螺纹的加工

图 3-10 所示为带直螺纹的圆弧母线回转轴，圆弧母线的两切点 *A*、*B* 的坐标：*A*（25.394，−46.634），*B*（27.83，−50），毛坯件的尺寸为 75mm×ϕ30mm，

材料为 45 钢，试编制加工程序。

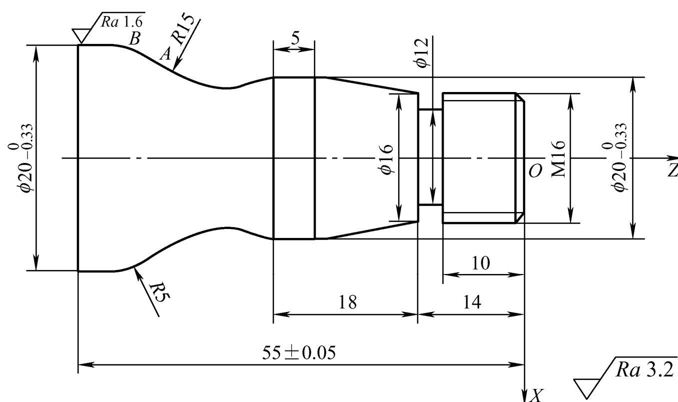


图 3-10　带直螺纹的圆弧母线回转轴

1. 工艺分析

1）分五步来完成加工，即初车外圆（G71），精车（G70）外圆，切槽，然后车 M16 粗牙螺纹（螺距为 2mm），最后切断；选用 T01 号车刀、T02 号螺纹车刀、T03 号切槽刀。

2）G71 外圆粗加工时，单边粗车背吃刀量为 2mm，即 U=2，R 退刀量的值为 1mm，精车余量为 0.5mm。

3）工件按多次分层切除各部分毛坯余量，最后达到加工尺寸要求。

2. 编写程序

根据题意编程如下：

```
%O432;                                  程序名
N05 G50 X100 Z100;                      建立工件坐标系，进行刀具补偿
N10 T0101 M03 S600 F0.2 M08;            自动换刀，并进行刀具补偿
N15 G00 X32 Z2;
N20 G01 Z0 F0.2;
N25 X-1;                                粗车端面，进给量为 0.3 mm/r
N30 G00 X32 Z2;
N35 G71 U2 R1;                          G71 粗加工循环
N40 G71 P90 Q150 U0.5 W0.25 F0.2;       循环开始程序段
N45 Z0;
N50 X16 Z-0.5;
N55 Z-14;
N60 X20 Z-27;
N65 G02 X25.394 Z-46.634 R15;           车 R15mm 圆弧
N70 G03 X27.83 Z-50 R5;                 车 R5mm 圆弧
N75 G01 Z-59;                           循环结束
N80 S1000;
N85 G70 P90 Q150;                       G70 精加工循环
N90 G00 X100 Z100;
N95 T0303 S500;                         自动换切槽刀
N100 G00 X30 Z-14;
N105 G01 X12 10.05;                     切退刀槽
```

```
N110 G04 X0.5;
N115 G00 X30;
N120 G00 X100 Z100;
N125 T0202 S300;                    自动换螺纹车刀
N130 G00 X20 Z4;
N135 G92 X15.5 Z-12 F2;             车螺纹循环第一次
N140 X15;
N145 X14.5;                         N145～N160 为不同深度车螺纹
N150 X14.0;
N155 X13.84;
N160 X13.835;                       车到螺纹底径循环结束
N165 G00 X100 Z100;
N170 G00 X32 Z-59.975;
N175 G01 X-1 F0.05;
N180 G00 X100;
N185 Z100;
N190 M05 M09;
N195 M30;
```

例 2：传动轴加工

图 3-11 图所示零件的毛坯尺寸为ϕ72mm×150mm，试编写加工工艺及加工程序。

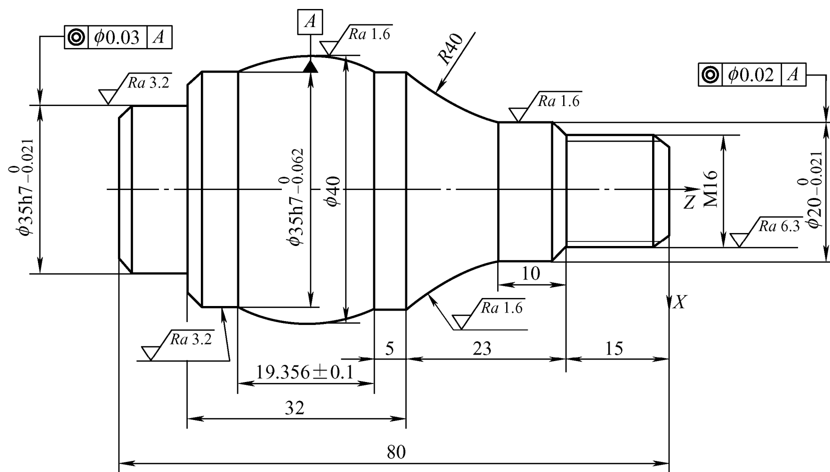


图 3-11　传动轴

1. 工艺分析

（1）零件加工的工艺分析　根据零件的轮廓形状，现采用一次装夹，夹ϕ25mm 外圆，先用右偏刀加工 M16、*R*40mm、ϕ40mm、ϕ35H7 达到图样要求，用螺纹车刀加工 M16 螺纹，然后用左偏刀车ϕ25mm 外圆和倒角达到图样要求，最后倒角和切断工件。

（2）刀具的选择　由于工件材料为 42CrMo 合金钢，毛坯为锻件，强度和硬度较高，最好是粗、精加工刀具分开，以保证精加工的表面质量。

1）刀具材料的牌号：粗加工时选用 YT5，精加工时选用 YT30。

2）刀具种类的选择：由于工件轮廓中有ϕ40mm 球面的加工，为了防止刀具副切削刃的干涉，宜采用的尖形车刀或偏头刀。如果数控机床具有刀尖圆弧半径补偿功能，可以选用对

称型机夹式圆弧刀片车刀。

3）由于工件材料强度和调质硬度高，加工螺纹的刀具不宜采用高速钢，因为表面粗糙度难以达到图样要求。最好选择先进的机夹式螺纹车刀，刀片材料选用 W1 或 W2 或涂层刀片。车螺纹时要采用较高的主轴转速和较小的切削深度。为了提高螺纹表面质量，最后可以空走刀车螺纹一次。

加工该件的程序共要 5 把刀具：粗车刀、精车车刀、60°螺纹车刀、切断刀、90°左偏刀。如果刀架只能安装 4 把刀，就只有将粗、精车外圆用同一把刀。

2. 加工程序

加工程序如下：

%O401；	程序号
N05 G50 G95 G90 X100 Z100；	程序初始化
N10 M03 S02；	主轴正转，选转速为 825r/min
N15 T0101；	调用 93°偏头外圆车刀
N20 G00 X55 Z3；	建立切削循环起点
N25 G73 U18 W4 R0.6；	G73 封闭粗车循环
N30 G73 P70 Q170 Ul W0.5 F100；	
N35 G00 X12；	刀具快速移动到倒角位置
N40 G01 Z0 F80；	刀具以进给速度车到端面
N45 X15.9 Z-2；	倒角 $C2$
N50 Z-15；	
N55 X16；	N35～N85 为轮廓精加工编程
N60 X19.98 Z-17；	
N65 Z-25；	
N70 G02 X34.97 Z-38 R40；	循环开始
N75 G01 Z-43；	
N80 G03 X34.97 Z-62.365 R20；	
N85 Z-90；	外圆多车长 10mm
N90 G70 P70 Q170；	精加工循环
N95 G00 X100 Z100；	回到换刀点
N100 T0202；	换 60°螺纹车刀
N105 G00 X22.24；	车螺纹循环起点
N110 G92 X15.5 Z-15 F2；	车螺纹循环第一次
N115 X15；	
N120 X14.5；	N110～N135 为不同深度车螺纹
N125 X14.0；	
N130 X13.84；	
N135 X13.835；	车到螺纹底径
N140 G00 X100 Z100；	回到换刀点
N145 T0303；	换切槽刀，刀宽 4mm，右刀尖对刀
N150 G00 Z-80；	
N155 X36；	到切槽循环起点
N160 G75 R3 F30；	
N165 G75 X20 W-20 P4000 Q3000；	G75 循环切空刀槽，左偏刀刀宽 16mm
N170 G00 X100；	循环结束
N175 Z100；	到换刀点
N180 T0404；	调用 90°左偏刀
N185 G00 Z-82；	建立 G90 循环起点

N190 X36；	
N195 G90 X30 Z-10 F100；	到达车削深度，粗车第一刀
N200 X26；	
N205 X24.98；	精车ϕ25mm 外圆
N210 G00 X21；	
N215 G01 Z-80 F30；	
N220 X25 Z-78；	倒角 *C* 2
N225 G00 X31；	
N230 Z-71；	走到倒角前
N235 G01 Z-70；	
N240 X35 Z-8；	倒角 *C* 2
N245 G00 X100；	
N250 Z100；	回到换刀点
N260 M30；	程序结束

相关知识点

螺纹切削复合循环（G76）

螺纹切削复合循环只需指定一次有关参数，可以完成一个螺纹全部加工，且有利于改善刀具的切削条件，如图 3-12 所示。

编程格式：

G76 P（m）（r）（a） Q（Δd_{min}） R（d）；

G76 X（U） Z（W） R（i） P（k） Q（Δd） F（L）

其中：

m——精加工重复次数，必须用两位数表示，范围从 01～99，该值是模态的。

r——螺纹末端倒角量，必须用两位数表示，范围从 00～99，该值是模态的。

a——刀尖角度，80°、60°、55°、29°、30°和 0°其中的一种，必须用两位数表示，该值是模态的。用地址 P 同时指定 m、r、a，当 m=02、r=03、a=60°时，即为 P0203 60。

Δd_{min}——最小背吃刀量（用半径值指定），此数值不可用小数点方式表示，如：Δd_{min} =0.01 时，需写成 Q10，该值是模态的。

d——精加工余量，该值是模态的。

U、W——终点坐标值。

i——车削锥螺纹时螺纹部分半径差，即螺纹切削起始点与切削终点的半径差。车削圆柱螺纹时，i=0。对于圆锥螺纹，当 X 向切削起始点坐标小于切削终点坐标时，i 为负，反之为正；

k——螺纹牙型高度（X 轴方向的半径值），此数值不可用小数点方式表示。如 k=1.3 时，需写成 P1300。

Δd——第一刀背吃刀量（用半径值指定），此数值不可用小数点方式表示。如Δd=0.5 时，需写成 Q500。

L——螺纹导程。

G76 螺纹切削复合循环刀具轨迹如图 3-12 所示。

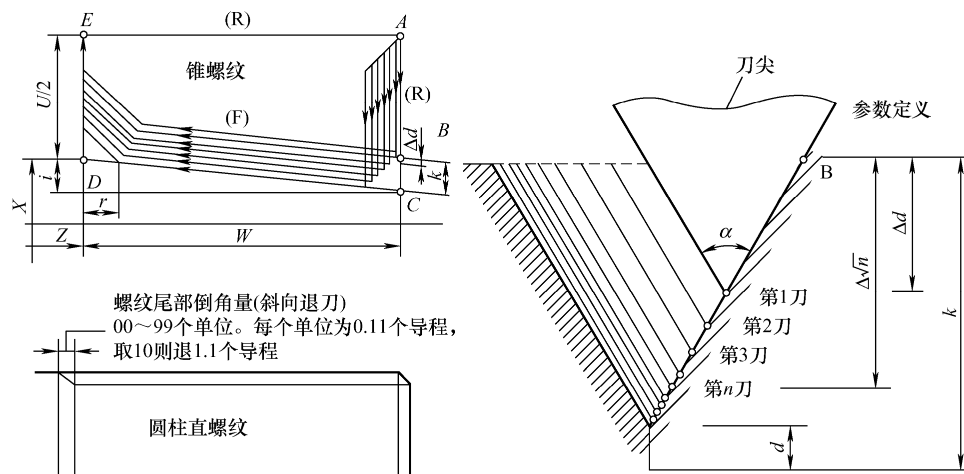


图 3-12　G76 螺纹切削复合循环刀具轨迹

例 3：内、外螺纹联接轴的加工

图 3-13 所示为内、外螺纹联接轴，其毛坯尺寸为ϕ50mm×130mm，材料为 45 钢，试编写加工工艺与数控程序。

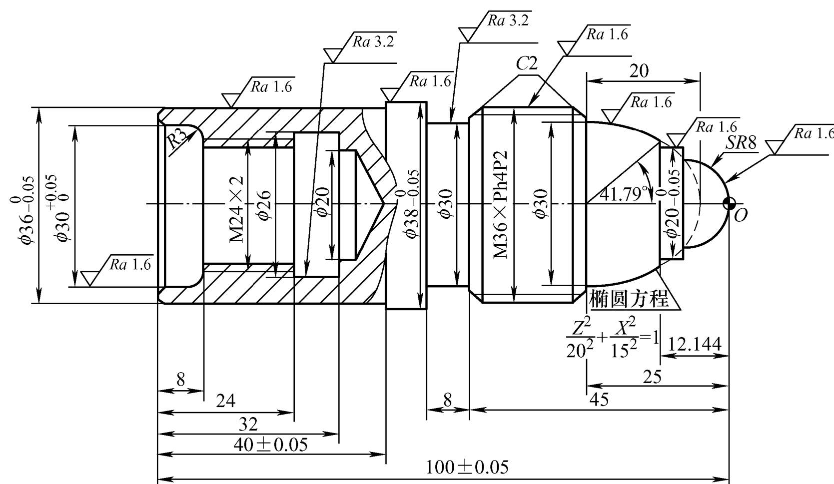


图 3-13　内、外螺纹联接轴

1. 工艺分析

加工本例工件时，难点有两个：一是内、外螺纹的加工，二是右端椭圆轮廓的加工。内螺纹的加工主要难在孔径小，刀杆细，刚性差，也不便于观察；椭圆轮廓的加工难在插补，编程复杂，其次是车刀的副偏角不能太小，否则加工到椭圆结束时会与工件的已加工表面发生干涉。为了方便车内孔，预先钻出相应直径和深度的孔，可手动完成。工序内容及所用刀具见表 3-3。

表 3-3 工序内容及所用刀具

序 号	工 步 内 容	主 要 指 令	刀 号	刀 具 特 点
1	夹工件右端，棒料伸出卡盘外约 65mm，找正后夹紧			
2	麻花钻装入尾座，手动钻ϕ20mm 孔			ϕ20mm 锥柄麻花钻
3	左端外轮廓的粗、精加工	G70/G71	T01	93°机夹外圆车刀（硬质合金镀钛刀片）
4	左端内孔轮廓的粗、精加工	G70/G71	T04	机夹镗刀
5	左端内槽的粗、精加工	G01	T05	宽 3mm 的机夹内切槽刀
6	左端内螺纹的粗、精加工	G76	T06	60°机夹内螺纹刀
7	工件调头，垫铜皮，按已加工面打表找正工件，卡紧			
8	右端外轮廓的粗、精加工	G73	T01	93°机夹外圆车刀
9	右端外槽及倒角加工	G01	T02	宽 4mm 的机夹外切槽刀
10	右端双头外螺纹的粗、精加工	G76	T03	60°机夹外螺纹刀

2．螺纹加工的相关计算

螺纹总切削深度，　　$h=0.6495P_h=0.6495\times2\text{mm}=1.299\text{mm}$

内螺纹小径，　　$d=D-2h=(24-2\times1.299)\text{mm}=21.402\text{mm}$

3．加工程序

零件左端部分加工（必须在钻足够深孔后才能进行自动加工）程序：

```
O0001;                          程序名
N05 G54 G98 G21;                G98 指定分进给，用 G21 指定米制单位
N10 M03 S750;                   主轴正转，转速为 750r/min
N15 T0101;                      选择 1 号外圆车刀，导入刀补
N20 G00 X42 Z0;                 绝对编程，快速移动到达端面的径向外
N25 G01 X18 F50;                车削端面（由于已钻孔，所以 X 到 18 即可）
N30 G00 X41 Z2;                 快速到达轮廓循环起刀点
N35 G71 U1.5 R2;                外径粗车循环
N40 G71 P45 Q70 U1 W0.1 F150;
N45 G01 X34;                    N45～N70 为循环部分轮廓，从循环起点进给移动到轮廓
N50 Z0;                         起始点
N55 G03 X36 Z-1 R1;             车削圆角
N60 G0l Z-40;                   车削φ36mm 的圆柱面
N65 X38;                        车削台阶
N70 Z-55;                       车削φ38mm 的圆柱面
N75 G00 X100;                   沿径向快速退出
N80 Z200;                       沿轴向快速退出
N85 M05;                        主轴停转
N90 M00;                        程序暂停
N95 M03 S1200;                  主轴重新起动，转速为 1200r/min
N100 T0101;                     重新调用 1 号外圆车刀并修改刀补量
N105 G0 X42 Z2:
Nll0 G70 P45 Q70 F80;           从 N45 到 N70 对轮廓进行精加工
N115 G00 X100;                  刀具沿径向快退
N120 Z200;                      刀具沿轴向快退
N125 M05;                       主轴停转
```

N130 M00；	程序暂停，测量零件，断点从 N95 开始
N135 M03 S600；	主轴正转，转速为 600r/min
N140 T0404；	选择 4 号镗刀，导入刀补
N145 G00 X20 Z2；	快速移动到孔外侧
N150 G71 U1 R1；	内轮廓粗车循环，给定加工参数
N155 G7l P160 Q195 U-1 W0.1 F120；	N160～N195 为循环部分轮廓
N160 G01 X32；	从循环起刀点移动到轮廓起始点
N165 Z0；	
N170 X30 Z-1；	车削 *C*1 倒角
N175 Z-5；	车削 ϕ30mm 的圆柱孔
N180 G02 X24 Z-8 R3；	车削 *R*3mm 的圆弧
N185 G01 X21.7；	车削台阶
N190 Z-32；	车削内螺纹圆柱孔
N195 X19；	车削台阶
N200 Z200；	沿轴向快速退出
N205 M05；	主轴停转
N210 M00；	程序暂停，测量粗镗后的内孔直径
N215 M03 S1200；	主轴正转，转速为 1200r/min
N220 T0404；	调用 4 号刀补，引入刀具偏移量或磨损量
N225 G00 X20 Z2；	快速移动到孔外侧
N230 G70 P160 Q195 F100；	从 N160～N195 对内轮廓进行精加工
N235 G00 Z200；	沿轴向快速退出
N240 M05；	主轴停转
N245 M00；	程序暂停，测量零件，断点从 N215 开始
N250 M03 S500；	主轴正转，转速为 500r/min
N255 T0505；	选择 5 号切内槽刀，导入刀补
N260 G00 X20 Z5；	快速定位到孔外一点
N265 G01 Z-27；	切内槽，走到轴向起切点
N270 G01 X25.5 F30；	沿 *X* 向以 F30 的速度切削内槽至 ϕ25.5mm
N275 X21；	沿 *X* 向进给至 ϕ21mm
N280 Z-30；	沿 *Z* 向走到-30 的位置
N285 X25.5；	沿 *X* 向以 F30 的速度切削内槽至 ϕ25.5mm
N290 X21；	沿 *X* 向进给至 ϕ21mm
N295 Z-32；	沿 *Z* 向走到-32 的位置
N230 X26；	沿 *X* 向以 F30 的速度切削内槽至 ϕ26mm
N235 Z-27；	沿槽底以 F30 的速度切削槽底至 Z-27
N240 X20；	沿 *X* 向进给至 ϕ20mm
N245 G00 Z200；	沿轴向快速移动到 *Z*200 处
N250 M05；	主轴停轴
N255 M00；	程序暂停
N260 M03 S800；	主轴正转，转速为 800r/min
N265 T0606；	选择 6 号内螺纹车刀，导入刀补
N270 G00 X21 Z5；	快速定位至螺纹起车点，轴向有空刀导入量
N275 G76 P02 01 60 Q80 R-0.08 ；	螺纹精加工重复 2 次，螺纹末端倒角量为 01，刀尖角度为 60°，最小背吃刀量为 0.08mm
N280 G76 X24 Z-25 R0 P1299 Q450 F2；	加工左端内螺纹，螺距为 2mm
N285 G00 X100 Z200；	快速退出
N290 T0101；	换 1 号外圆车刀
N295 M30；	程序结束
%；	程序结束符

零件右端部分加工程序：

O0002；	程序名
N05 G54 G98 G21；	程序初始化
N10 M03 S750；	主轴正转，转速为 750r / min
N15 T0101；	选择 1 号外圆车刀，导入刀补
N20 G00 X42 Z0；	绝对编程，快速到达端面的径向外
N25 G01 X-0.5 F50；	车端面，车削过中心到 *X*-0.5
N30 G00 X41 Z2；	快速到达轮廓循环起刀点
N35 G71 U1.5 R2；	外径粗车循环
N40 G71 P45 Q105 U1 W0.1 F150；	
N45 G01 X0；	N45～N105 为循环部分轮廓，从循环起刀点移动到轮廓处
N50 Z0；	起始点
N50 G03 X16 Z-8 R8；	加工 *R*8mm 圆弧
N55 G01 X20；	加工台阶
N60 Z-12.144；	加工ϕ20mm 外圆
N65 #1=12.856；	准备加工椭圆，宏程序编程
N70 WHILE[#1 GE 0] D01；	椭圆加工，WHILE 条件循环
N75 G01 X[3*SQRT[400-#1*#]/2]	
Z[#1-25] F150；	加工椭圆的一段
N80 #1=#1-0.1；	*Z* 轴段为长半径，每循环一次步长增加 0.1mm
N85 ENDl；	
N90 G01 X32；	加工台阶
N95 X35.8 Z-27；	螺纹倒角
N100 Z-53；	加工螺纹光轴外圆
N105 X40；	退刀
N110 G00 X100；	刀具沿径向快退
N115 Z200；	刀具沿轴向快退
N120 M05；	主轴停转
N125 M00；	程序暂停，用于粗加工后零件测量
N130 M03 S1200；	主轴重新起动，转速为 1200r/min
N135 T0101；	调用 1 号刀补，调整刀具偏移量或磨损量
N140 G00 X42 Z2；	
N145 G70 P45 Q105 F80；	从 N45～N105 对轮廓进行精加工
N150 G00 X100；	刀具沿径向快退
N155 Z200；	刀具沿轴向快退
N160 M05；	主轴停转
N165 M00；	测量精加工后的零件，断点从 N130 开始
N170 M03 S500；	主轴重新起动，转速为 500r/min
N175 T0202；	换 2 号切槽刀
N180 G00 X40 Z-49；	快速到达切槽起始点
N185 G75 R0.1 F30；	指定径向退刀量 0.1mm
N190 G75 X30 Z-53 P500 Q3500 R0；	指定槽底、槽宽及加工参数
N195 G00 X40；	切槽完毕后，沿径向快速退出
N200 Z-47；	*Z* 向进给至螺纹左侧倒角的起点
N205 G01 X36 F30；	走到螺纹左侧倒角的起点
N210 X32 Z-49；	倒角
N215 G00 X100；	沿径向退出
N220 X200；	沿轴向退出
N225 M03 S600；	若螺纹未到尺寸，必须从此断点开始再加工

```
N230 T0303;                               换 3 号螺纹刀，导入刀补
N235 G00 X31 Z-20;                        到达第一头螺纹加工起点，轴向有空刀导入量
N240 G76 P02 03 60 Q80 0.05;              螺纹循环加工参数设置，螺纹精加工两次
N245 G76 X27.402 Z-46 R0 P1299 Q450 F4;   加工右端外螺纹，螺距为 4mm
N250 G00 X31 Z-22;                        到达第二头螺纹起点，与第一头起点相差一个螺距
N255 G76 P02 03 60 Q80 R0.05;             赋参数，两次精加工
N260 G76 X27.402 Z-46 R0 P01299 Q450 F4;
N265 G00 X100;                            沿径向退出
N270 Z200;                                沿轴向退出
N275 T0101;                               换上 1 号刀，为下一个零件的加工作准备
N280 M30;                                 程序结束
```

点　评

螺纹循环（G76）的参数虽然较多，但只需一次指定有关参数就可完成一个螺纹全部加工，且有利于改善刀具的切削条件。注意编程格式“G76 P（m）（r）（a）Q（Admin）R（d）;”。程序段“G76 P02 01 60 Q80 R-0.08;”表示：螺纹精加工重复 2 次，螺纹末端倒角量为 01，最小背吃刀量为 0.080mm，刀尖角度 60°；若 r=03，则倒角量=3×0.1×4mm（导程）=1.2mm。

3.4　内孔车削加工

相关知识点

孔的深度尺寸与孔的直径大小之比（*L*/*D*）称为孔的深径比：*L*/*D*≤5 的孔为一般的孔，*L*/*D*>5 的孔则为深孔。深孔又可分为三类：*L*/*D*≥5～20 的孔属一般深孔，常在钻床上或车床上用深孔刀具或用接长麻花钻就可以加工；*L*/*D*≥20～40 的孔属中等深孔，常在车床上用深孔刀具加工；*L*/*D*≥40～100 的孔属特殊深孔。

1. 内孔车削加工的特点

1）内孔车削加工时，观察切削情况很困难。

2）刀杆尺寸受孔径和孔深的限制，不能做得太粗，又不能太短，因此刚性很差。

3）排屑和冷却困难。

4）圆柱孔的测量比外圆困难。

2. 车孔的关键技术

车孔的关键技术是解决内孔车刀的刚性和排屑问题。

1）径向力将直接导致刀杆弯曲变形。因深孔加工用的刀杆长径比太大，施加在刀杆上的作用力方向难免偏离刀杆轴线，从而产生径向力，当径向力达到一定程度时，就会导致刀杆弯曲变形。孔的长径比越大，刀杆刚性就越差，就越容易弯曲变形，轻者引起车削孔走偏，从而影响孔的加工精度，重者引起刀杆折断或工件损坏，无法完成孔的加工。

2）孔加工跟着感觉走。孔加工时，操作人员无法直接观察到刀具切削情况，只能依靠听声音、看切屑、油压、观察机床负荷等判断切削中的加工情况，在多数情况下，深孔加工

只能跟着感觉走，造成加工质量不稳定。

3）散热条件差、排屑困难、刀具容易失效等。随着车孔深度的增加，切屑从孔中排出的难度逐渐加大，散热条件也越来越恶化，刀具容易失去切削能力。必须采用可靠的手段进行断屑，控制切屑的长短与形状，以利于顺利排除，防止切屑堵塞。因此，内孔车削加工的关键是：

1）尽量增加刀杆的截面积。

2）刀杆的伸出长度尽可能缩短。

3）内孔车刀的后面一般磨成两个后角的形式。

4）车通孔的内孔车刀最好磨成正刃倾角

3. 车削内孔时常见的问题及其预防方法（表 3-4）

表 3-4　车削内孔时常见的问题及其预防方法

问　　题	产 生 原 因	预 防 方 法
内孔不圆	1）主轴承间隙过大 2）加工余量不均，没有分粗、精车 3）薄壁零件夹紧变形	1）修理机床 2）分粗、精车 3）改变装夹方法
内孔有锥度	1）刀具磨损 2）主轴轴线歪斜 3）工件没有找正 4）刀杆刚性差，产生让刀 5）刀尖轨迹和主轴轴线不平行 6）刀杆过粗和工件内壁相碰	1）提高刀具寿命 2）找正导轨和主轴轴线平行 3）仔细找正工件 4）选用较粗的刀杆 5）大修机床导轨 6）把刀杆选小
内孔不光	1）切削用量不当 2）车刀磨损 3）刀具振动 4）车刀几何角度不合理 5）刀尖低于工件中心	1）重选切削用量 2）重磨车刀 3）加粗刀杆，降低切削速度 4）合理选择车刀角度 5）刀尖高于工件中心安装

例 1：内孔的车削

图 3-14 所示零件的毛坯尺寸为ϕ50mm×50mm，试编写加工工艺及加工程序。

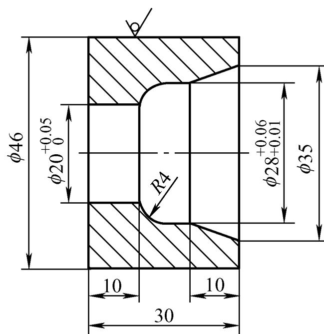


图 3-14　内孔车削

1. 加工条件

1）长度已加工，为 30mm。

2）已预钻ϕ18mm 内孔。

2. 加工工艺

1）装夹毛坯件，伸出长度为 10mm 左右。

2）看清图样尺寸，选用一把 90° 内孔偏刀，伸出长度为 40mm。

3）采用试切对刀的方法对刀。

4）采用外圆、内圆粗车循环（G71）的方法粗车内孔，再用精车循环（G70）精车。

5）粗车孔主轴转速为 256r/min，精车孔，主轴转速为 560r/min。

6）编写程序（内孔车刀 T0200）。

7）程序检查：空运行检查参数，翻页检查尺寸，仿真检查图形。

8）启动程序、进行切削加工。

9）加工完毕，检查、修改后交验。

3．程序编写

```
%O1602;
N10 G50 X100 Z60;
N20 M03 S560 T02;
N30 G00 X17 Z2;
N40 G71 U1.5 R0.5;                      循环切削
N50 G71 P60 Q110 U-0.3 W0.1 F80;        N60～N110 内轮廓循环切削
N60 G00 X35;
N70 G01 Z0 F30;
N80 X28 Z-10;
N90 Z-16;
N100 G03 X20 Z-20 R4;
N110 G01 X20 Z-30;
N120 G70 P60 Q110;                      取消循环切削
N130 G00 X100 Z60;
N140 M05 T0200;
N150 M30;
```

例 2：连接套的车削

连接套的毛坯尺寸是ϕ80mm×65mm，材料为 45 钢，如图 3-15 所示。试编写加工工艺与数控程序。

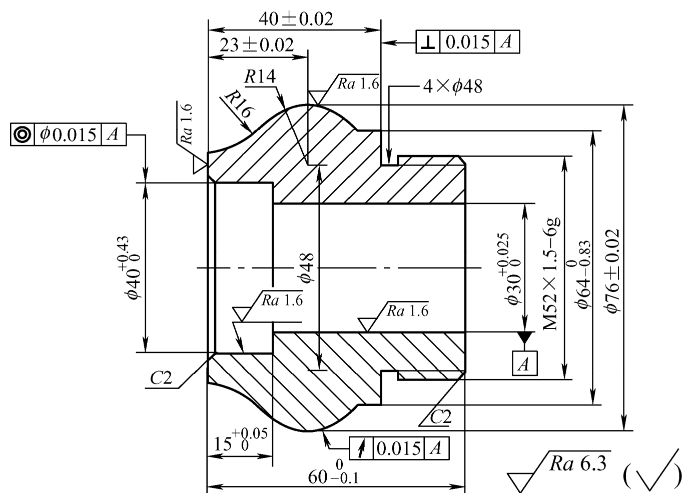


图 3-15　连接套零件图

1．工艺分析

连接套毛坯及成品如图 3-16 所示。连接套由形状复杂的外形、台阶孔、螺纹组成，有同轴度、垂直度及径向圆跳动要求，且要调头分两次装夹工件，就很难保证上述要求。同时，若先加工 $R16/R14$ 外形，工件调头加工螺纹，卡盘无法卡圆弧面；反之，若先加工螺纹端，工件再调头加工 $R16/R14$ 外形，外螺纹要卡坏，因此必须设计专用夹具——心轴。

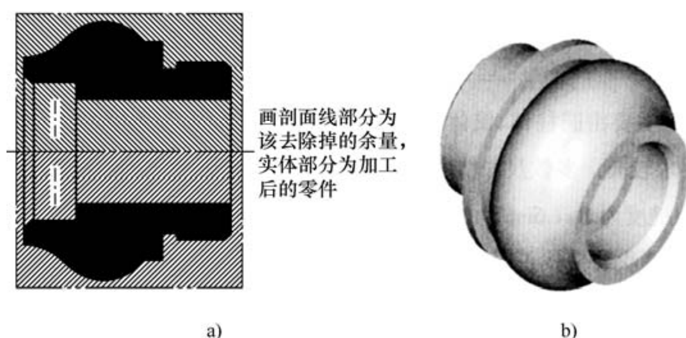


图 3-16　连接套毛坯及成品示意图

2. 工序内容与程序

（1）“基准先行”加工端面与外圆　如图 3-17 所示，夹毛坯ϕ 80mm 一端，长 25mm 左右，车端面平整见光，车外圆至ϕ 78mm，所用刀具为左偏外圆车刀。切削用量见表 3-5。

表 3-5　加工端面与外圆的切削用量

刀　　号	型　　号	切 削 用 量			所 用 指 令
		a_p/mm	f/（mm/r）	s/（r/min）	
T01	左偏外圆车刀κ_r=93°	2	0.08	150	G96、G94
			0.18	600	G97、G90

加工端面与外圆的程序如下：

```
O0001;
N05 G50 X90 Z90;                建立坐标系
N10 T0101;
N15 G96 S150 M03;               设定恒线速度
N20 G50 S1300;
N25 G00 X84 Z5;                 循环起点
N30 G94 X0 Z0 F0.08;            加工端面
N35 G97 S600;
N40 G90 X78 Z-35 F0.18;         加工外圆
N45 G00 X90 Z90;
N50 M30;
```

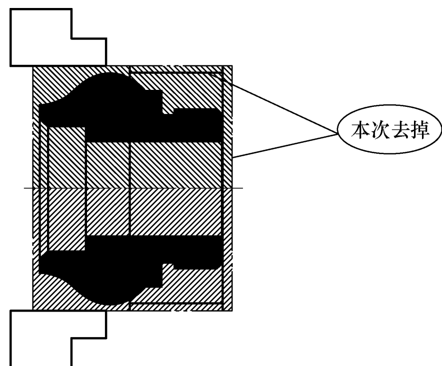


图 3-17　连接套端面与外圆的加工

（2）端面及内孔加工工艺过程　用自定心卡盘夹工件ϕ78mm 一端，长 25mm 左右，采用“一刀活”的方式完成下列各工步内容，确保工件的同轴度。连接套端面与内孔加工如图 3-18 所示，切削用量见表 3-6。

1）粗加工端面留 0.2mm 余量。

2）粗加工外圆至ϕ78mm。

3）钻中心孔，深 3mm。

4）钻ϕ18mm 通孔。

5）扩ϕ18mm 通孔至ϕ25mm。

6）粗车内孔，X、Z向各留余量 0.2mm。

7）精车内孔（反车）。
8）精车端面。

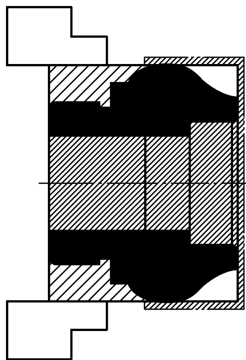


图 3-18　连接套端面与内孔的加工

表 3-6　加工端面与内孔的切削用量

刀具号	型号	切削用量			所用指令
		a_p/mm	f/（mm/r）	s/（r/min）	
T01	左偏外圆车刀κ_r=93°	2	0.08	150	G96、G94
			0.18	600	G97、G90
T02	中心钻ϕ3			800	手动
T03	钻头ϕ18			300	手动
T04	钻头ϕ25			200	手动
T05	内孔粗车刀κ_r=102.5°	1	0.12	500	G71
T06	内孔精车刀（反车）	0.2	0.08	300	G96、G42
T07	端面精车刀	0.2	0.08	300	G42

加工端面与内孔的程序如下：

```
%O20131;
N05 T0101;
N10 G50 X100 Z100;                    建坐标系
N15 G96 S150 M03;
N20 G50 S3000;
N25 G00 X84 Z5;
N30 G94 X0 Z0.2 F0.08;                端面
N35 G97 S600;
N40 G90 X78 Z-30 F0.18;               外圆
N45 G00 X100 Z100 T0100;
N50 G28 U0;                           回参考点
N55 G28 W0;
N60 T0505;
N65 G00 X20 Z2 S500 M03;
N70 G71 U2 R0.1;                      粗车内孔
N75 G71 P80 Q105 U-0.4 W0.2 F0.12;
```

```
N80 G00 X48；
N85 G01 X40 Z-2；
N90 Z-15；
N95 X30；
N100 Z-65；
N105 G00 X20；
N110 G00 X100 Z100 T0500；
N115 T0606；                          精车内孔
N120 G96 S300；
N125 G50 S3000；
N130 G00 G42 X25 Z5；
N135 G01 Z-65 F0.08；
N140 X30；
N145 Z-15；
N150 X40；
N155 Z-2；
N160 X48 Z2；
N165 G00 G40 X100 Z100 T0600；
N170 T0707；                          精车端面
N175 G00 G42 X25 Z5；
N180 G01 Z0 F0.08；
N185 X80；
N190 G00 G40 X100 Z100 T0700；
N195 M30；
```

（3）零件外形的加工工艺过程　利用芯轴，采用一夹一顶方式装夹工件加工零件的外形。连接套外形的加工如图 3-19 所示，切削用量见表 3-7，所用刀具如图 3-20 所示。

表 3-7　连接套外形加工的切削用量

刀　具　号	型　　号	切 削 用 量			所 用 指 令
		a_p/mm	f/（mm/r）	s/（r/min）	
T01	左偏外圆粗车刀 κ_r=93°		0.18	800	G71
T02	右偏外圆粗车刀 κ_r=93°		0.18	800	G71
T03	左偏外圆精车刀 κ_r=93°		0.08	300	G70
T04	右偏外圆精车刀 κ_r=93°		0.08	300	G70
T05	切槽刀 B=4mm		0.08	400	G01
T06	螺纹车刀		1.5	600	G92

1）粗车右端外圆，留 0.2mm 余量。
2）粗车左端外圆，留 0.2mm 余量。
3）精车右端外圆。
4）精车左端外圆。
5）切槽。
6）加工螺纹。

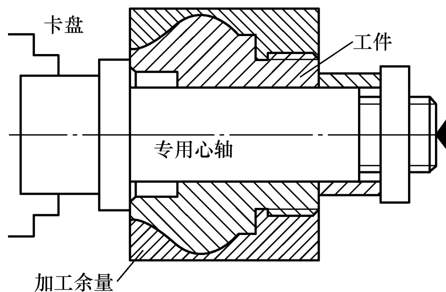


图 3-19　连接套外形的加工

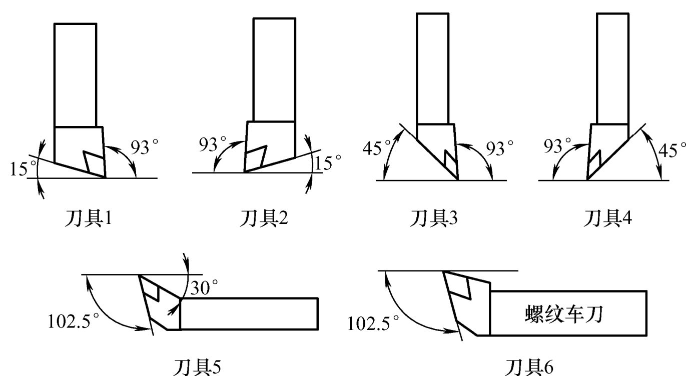


图 3-20　连接套外形加工所用的刀具

加工零件外形的程序如下

```
O2013；
N05 T0101；
N10 G50 X100 Z100；
N15 G97 S800 M03；
N20 G00 X82 Z2；
N25 G71 U2 R0.1；                      粗车右端外圆
N30 G71 P35 Q70 U0.4 W0.4 F0.18；
N35 G00 X44；
N40 G01 X52 Z-2 F0.08；
N45 Z-20；
N50 X64；
N55 Z-25.511；
N60 G03 X76 Z-37 R14；
N65 G01 Z-40；
N70 X82；
N75 G00 X100 Z100 T0100；
N80 T0202；
N85 G00 X82 Z-65；
N90 G71 U2 R0.1；                      粗车左端外圆
N95 G71 P100 Q30 U0.4 W-0.2 F0.18；
N100 G00 X54.523；
N105 G01 Z-60 F0.08；
N110 G03 X65.977 Z-47.733 R16；
N115 G02 X76 Z-37 R14；
N120 G01 W3；
N125 X82；
N130 G00 X100 Z100 T0200；
N135 T0303；                           精车右外圆
N140 G96 S300；
N145 G50 S3000；
N150 G00 G42 X82 Z2；
N155 G70 P35 Q70；
N160 G00 G40 X100 Z100 T0300；
N165 T0404；                           精车左外圆
```

```
N170 G00 G41 X82 Z-65；
N175 G70 P100 Q125；
N180 G00 G40 X100 Z100 T0400；
N185 T0505；                        切槽
N190 G00 X80 Z-20 S150；
N195 G01 X48 F0.08；
N200 G04 X5；
N205 G01 X80；
N210 G00 X100 Z100 T0500；
N215 T0606；                        切螺纹
N220 G97 S600；
N225 G00 X55 Z3；
N230 G92 X51.2 Z-19 F1.5；
N235 X50.6；
N240 X50.2；
N245 X50.04；
N250 G00 X100 Z100 T0600；
N255 M30；
```

相关知识点

FANUC 系统宏指令编程

1．用户宏程序

宏程序的定义：由用户使用变量编写的具有算术和逻辑运算功能并能应用条件转移和循环语句的一种子程序。

（1）变量表示，在#后指定变量号　＃I（I=1，2，3，…）或＃[＜表达式＞]，如：＃5，＃109，＃501，＃[＃1+＃2−12]。也可以用表达式指定变量号，这时表达式要用方括号括起来，如：#[#1+#2−12]，地址字后面指定变量号或公式，格式：＜地址字＞＃I 、＜地址字＞[＜表达式＞]，如：F＃103，设＃103=15，则为 F15；Z−＃110，设＃110=210 则为 Z−210，X[＃24+＃18∗COS[＃1]]。变量号可用变量代替，如：＃[＃30]，设＃30=3 则为＃3。变量不能使用地址 O，N，I，如：O＃1、I＃2 是不允许的。

（2）变量值的范围　局部变量和公共变量可以有值 0 和在下述范围内的值：−1047～−1019 和 1029～1047，如果计算结果无效，发出 111 号报警。

（3）忽略小数点　在程序中定义变量时，可以忽略小数点。例：当#1=123 被定义时，变量#1 的实际值为 123.000。

（4）变量值定义（引用）　为了在程序中引用变量，指定一个字地址其后跟一个变量号。当用表达式指定一个变量时，须用方括号括起来。例如“G01 X[#1+#2] F#3；”。引用的变量值根据地址的最小输入增量自动进行四舍五入，例如“G00 X#1；”，其中#1 的值为 12.3456，CNC 最小输入增量为 1/1000mm，则实际命令为“G00 X12.346；”。为了将引用的变量值的符号取反，在#号前加“−”号，例如“G00　X−#1；”。当引用一个未定义的变量时，忽略变量及引用变量的地址，例如#1=0，#2= “空”，则“G00 X#1 Y#2；”的执行结果是“G00 X0；”。宏程序中变量有局部变量＃0～＃49、公共变量＃50～＃199 和系统变量几种类型，见表 3-8。

表 3-8　变量类型

变　量　号	变 量 类 型	功　　能
#0～#49	当前局部变量	局部变量只能在宏中使用，以保持操作的结果，关闭电源时，局部变量被初始化成"空"。宏调用时，自变量分配给局部变量
#50～#199	公共变量	公共变量可在不同的宏程序间共享
#20～#599	层局部变量	系统变量用于读写各种 NC 数据项，如当前位置、刀具补偿值
#1000 以上	系统变量	系统变量用于读写各种 NC 数据项，如当前位置、刀具补偿值

2. 运算指令

运算式的右边可以是常数、变量、函数、表达式，式中＃j、＃k 也可为常量，表达式右边为变量号、运算式。

定义：

＃I＝＃j

算术运算：

＃I=＃j+＃k

＃I=＃j－＃k

＃I=＃j*＃k

＃I=＃j / ＃k

逻辑运算：

＃I=＃JOR＃k

＃I=＃JXOR＃k

＃I=＃JAND＃k

正弦：＃I=SIN[＃j]

余弦：＃I=COS[＃j]

正切：＃I=TAN[＃j]

反正切：＃I=ATAN[＃j]

平方根：＃I=SQRT[＃j]

绝对值：＃I=ABS[＃j]

四舍五入化整：＃I=ROUND[＃j]

下取整：＃I=FIX[＃j]

上取整：＃I=FUP[＃j]

BCD→BIN（二进制）：＃I=BIN[＃j]

BIN→BCD：＃I=BCN[＃j]

优先级 ：函数→乘除（*，1，AND）→加减（＋，－，OR，XOR），如：

＃1=＃2＋＃3*SIN[＃4]；

括号为中括号，最多 5 重，圆括号用于注释语句 ，如：

＃1=SIN[[[#2+#3]*#4+#5]*#6]；　　　3 重，注意方括号[]要成对出现

3. 条件运算符

等于（=）：#j EQ #k

不等于（≠）：#j NE #k

大于（＞）：#j GT #k

小于（＜）：#j LT #k

大于或等于（≥）：#j GE #k

小于或等于（≤）：#j LE #k

4. 条件判别语句

格式 1：

IF 条件表达式；

…；

ELST；

…；

ENDIF；

格式 2：

IF 条件表达式；

…；

ENDIF；

5. 循环语句

格式 1：

WHILE 条件表达式；

…；

ENDW；

格式 2：

IF 条件表达式 GOTO n；

例 3：抛物线内孔加工

加工图 3-21 所示的抛物线内孔，抛物线方程为 $Z=X^2/16$，毛坯为 ϕ120mm×150mm 的实心件，已粗车到规定的尺寸及表面粗糙度值 Ra3.2μm，试进行加工工艺分析及数控程序编写。

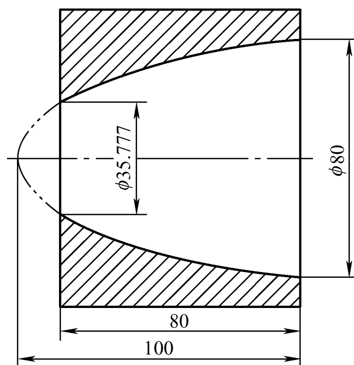


图 3-21　抛物线内孔

1. 相关知识

抛物线的参数方程为

$$\begin{cases} x = 2pv^2 \\ y = 2pt \end{cases}$$

准线方程为

$$l = -\frac{p}{2}$$

直角坐标方程为

$$y^2=2p\ (p>0)$$

2. 加工工艺分析

（1）工件安装与找正　零件外形规则，图中仅抛物线内孔要加工，其他部位均已加工到位，表面粗糙度值要求为 Ra3.2μm，可直接按工件外圆及端面为加工基准，打表圈圆找正工件，用自定心卡盘装夹工件，垫上铜皮直接卡紧工件即可。

（2）预加工　工件预钻ϕ30mm，方便内孔车削加工。

3. 编程思路

利用抛物线方程式 $Z=X^2/16$，换算成直径编程形式为 $Z=X^2/64$，则 X=sqrt[Z]/8。其中 Z 的取值范围为−80～0，在计算 X 坐标时，Z 取绝对值，为了方便计算，编程零点放在工件左端面中心，Z 值均为正值，应用宏指令及循环功能来编写程序，下面是抛物线内孔程序编制的关键：

1）轴的坐标计算。

2）Z 轴的坐标计算。

3）完成每次计算后的走刀，以“直线逼近”的方式加工。

4）Z 轴坐标设定为抛物线内孔控制“步距”，步距的大小直接影响抛物线内孔的几何精度，现设步距=0.3mm。

5）循环判断：加工角度是否小于或等于 360°，一直加工到等于 360°后就结束本次循环加工。

4．加工程序

```
%O209;                                  主程序号
N05 G92 X150.0 Z200.0 T0101;            建立工件坐标系，进行刀具补偿
N10 T0101;
N15 S300 M03;                           主轴正转，转速为 300r/min
N20 G90 G00 X28 Z2 M03 M07 S800;
N25 #1=-3;                              Z 坐标控制
N30 WHILE #1 GE -81 D01;                粗加工控制
N35 #2=SQRT[100+#1]/8;                  X 坐标控制，100+#1=97，从工件的右端面开始
N40 G00 Z[#1+0.3];
N45 G01 X[#2-0.3] F0.3;
N50 G00 X28 W2;
N55 #1=#1-3;
N60 END1;
N65 #10=0.2;                            半精加工 X 方向留余量
N70 #11=0.2;                            半精加工 Y 方向留余量
N75 WHILE #10 GE 0 D01;                 半精、精加工控制
N80 #1=-81;
N85 G00 Z-81 S1500;
N90 WHILE #1 LT 0.5 D02;                曲线加工控制
N95 #2=SQRT[100+#1]/8;                  X 坐标控制
N100 G1 X[#2-#10] Z[#1+#11] F0.1;
N105 #1=#1+0.3;
N110 END2;
N115 G00 X28;
N120 #10=#10-0.2;
N125 #11=#11-0.2;
N130 END1;
N135 G00 X100 Z200 M05 M09;
N140 T0100;
N145 M30;
```

5．容易产生的问题及注意事项

1）预钻ϕ30mm 内孔，在保证余量足够的情况下，预钻孔尽可能大，这样加工内孔的刀杆可较粗，刚性好，即刀杆应在不碰孔壁的前提下尽量粗些为宜。

2）车刀的刀尖应尽量与车床主轴的轴线等高。

3）刀杆伸出刀架的距离应尽可能短些，以改善刀杆刚性，减小切削过程中可能产生的振动。

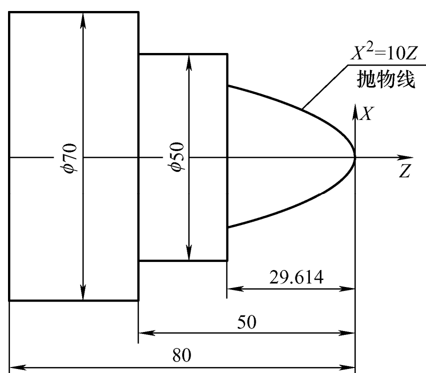


图 3-22　抛物线零件

6. 练习题

编写图 3-22 所示抛物线零件的加工程序，毛坯为ϕ100mm×80mm 的实心件，其中编程原点在工件右端面处，并以 Z 作为变量，其范围为−29.614～0。

3.5　铣削基础编程

例 1：简单直线圆弧零件轮廓编程

如图 3-23 所示的工件，已知其毛坯尺寸为 1500mm×1000mm×50mm，上下表面已加工，材料为 45 钢，要求在配有 SINUMERIK 840D 系统的数控铣床上进行加工。试分析加工工艺并编写加工程序，程序中要求使用刀具补偿功能。

1. 工艺分析

因为毛坯的上、下表面已加工，且毛坯尺寸 1500mm×1000mm×50mm 较大，选用压板把工件装夹到机床工作台上的合适位置。在装夹过程中，应对工件进行找正。找正时，将百分表用磁性表座固定在主轴上，百分表触头接触工件，按已加工表面“打表”找水平，在前后或左右方向移动主轴，找正工件上、下平面与工作台平行；如果不平行，则可用铜棒轻敲工件或垫塞尺的办法纠正，然后再重新找正。

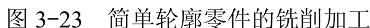


图 3-23　简单轮廓零件的铣削加工

2. 程序编制

选择工件上表面 O 作为编程原点，其加工程序如下：

```
%O435;
N05 G54 G17 G90 G01 Z40 F2000;           进入加工坐标系
N10 G90 G00 G41 D07 X250.0 Y550.0;       建立刀具半径补偿
N15 G01 Y900.0 F150;
N20 X450.0;
N25 G03 X500.0 Y1150.0 R650.0;
N30 G02 X900.0 R-250.0;                  大半圆，R 取负值
N35 G03 X950.0 Y900.0 R650.0;
N40 G01 X1150.0;
N45 Y550.0;
```

```
N50 X700.0 Y650.0;
N55 X250.0 Y550.0;
N60 G00 G40 X0 Y0 Z100;        取消刀补
N65 M30;
```

点　评

本例中，重点掌握圆弧编程的方法，当圆心角小于或等于 180° 时，半径 R 用正值，否则用负值，整圆加工只能用 IJK 方式编程。

相关知识点

轮廓铣削加工工艺知识

1. 顺铣与逆铣

在加工中，铣削分为逆铣与顺铣，当铣刀的旋转方向和工件的进给方向相同时称为顺铣，相反时称为逆铣。

逆铣时刀齿开始切削工件时的切削厚度比较小，导致刀具易磨损，并影响已加工表面；顺铣时刀具寿命比逆铣时提高 2～3 倍，刀齿的切削路径较短，比逆铣时的平均切削厚度大，而且切削变形较小，但顺铣不宜加工带硬皮的工件。由于工件所受的切削力方向不同，粗加工时逆铣比顺铣要平稳。

对于立式数控铣床所采用的立铣刀，装在主轴上相当于悬臂梁结构，在切削加工时刀具会产生弹性弯曲变形。当用铣刀顺铣时，刀具在切削时会产生让刀现象，即切削时出现“欠切”；而用铣刀逆铣时，刀具在切削时会产生啃刀现象。即切削时出现“过切”现象。这种现象在刀具直径越小、刀杆伸出越长时越明显，所以在选择刀具时，从提高生产率、减小刀具弹性弯曲变形的影响这些方面考虑，应选大的直径，但不能大于零件凹圆弧的半径；在装刀时刀杆应尽量伸出短些。

2. 轮廓铣削的进退刀方式

铣削平面类零件外轮廓时，刀具沿 *OXY* 平面的进退刀方式通常有三种。

例 2：平面零件的轮廓铣削及螺纹孔加工

零件如图 3-24 所示，程序原点设定：*Z* 向位于工件上表面，*X* 向、*Y* 向程序原点位于工件左下角 *O* 点。刀具选用直径为 16mm 的立铣刀，安全面高度为 20mm。编制此零件的加工程序。

1. 工艺分析

（1）选择基准面　经图样分析，以底平面与 100mm×100mm 正方形轮廓为定位基准，并预先加工好，在一次装夹下完成所有加工内容。

（2）工件装夹　工件选用机用虎钳进行装夹。具体装夹过程是：①使用百分表找正机用虎钳固定钳口

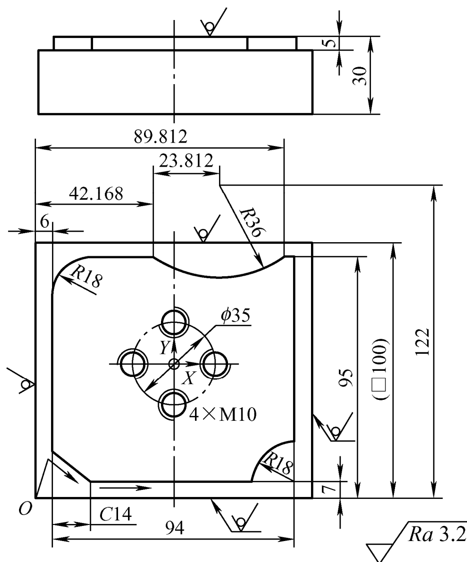


图 3-24　平面零件的轮廓铣削及螺纹孔加工

的平行度；②使用机用虎钳装夹 94mm 两侧面；③选用两个高度合适的等高块支撑工件的底面，等高块（支撑块）的位置应避开 4×M10 螺孔的加工区域，防止加工时刀具与等高块发生干涉。在装夹时，用铜棒轻轻地敲击工件的上表面，使工件底面与等高块（支撑块）的定位表面完全接触。

（3）确定加工路线　加工工艺路线为：外轮廓的加工，选用直径为 16mm 的立铣刀，安全面高度为 20mm；螺纹孔的加工，先钻中心孔，然后钻底孔，最后攻螺纹。T01 为ϕ2.5mm 的中心钻，刀具长度补偿号为 H01，T02 为ϕ8.5mm 的麻花钻，刀具长度补偿号为 H02，T03 为 M10 的丝锥，刀具长度补偿号为 H03。

2. 加工程序

外轮廓的加工程序：

```
%O607;
N05 G92 X0 Y-50.0 Z20.0;              建立工件坐标系
N10 M03 S800;
N15 G00 G4l X20.0 Y0 D01;             建立左刀补
N20 G01 Z-5.0 F250 M08;               下刀
N25 X6.0 Y21.0;                       开始切入工件
N30 X21.0 Y7.0;                       切 450° 斜角
N35 X76.0;                            加工下底边
N40 G02 X94.0 Y25.0 R18.0;            加工 R18mm 圆弧
N45 G01 Y95.0;                        加工右边
N50 X89.812;                          加工上边
N55 G02 X42.168 Y95.0 R36.0;          加工 R36mm 圆弧
N60 G01 X24.0;                        加工右边
N65 G03 X6 Y77.0 R18.0;               加工 R18mm 圆弧
N70 G01 X20.0;                        加工左边
N75 G00 G40 X0 Y-50.0;                取消刀补
N80 Z50.0;                            退回安全高度
N85 M30;                              程序结束
```

螺纹孔的加工程序：

```
%O608;
N05 G21 G40 G49 G54 G80 G90;          程序初始化
N10 G28 Z0;                           到换刀点
N15 T01 M06;                          换中心钻
N20 G43 G00 X200 Y200 Z200 H0l;
N25 M03 S500 F50;
N30 G99 G82 X35 Y0 Z-2.4 R5 P500;     中心钻钻孔，孔底延时
N35 X0 Y-35;
N40 X-35 Y0;
N45 G98 X0 Y35;
N50 G80 G49 M05;
N55 G28 Z0;
N60 T02 M06;                          换麻花钻
N65 G43 G00 X200 Y200 Z200 H02;
N70 M03 S600 F70;
N75 G99 G81 X35 Y0 Z-20 R5;           麻花钻钻螺纹底孔
N80 X0 Y-35;
```

```
N85 X-35 Y0;
N90 G98 X0 Y35;
N95 G80 G49 M05;
N100 G28 Z0;
N105 T03 M06;                        换丝锥
N110 G43 G00 X200 Y200 Z200 H03;
N115 M03 S100 F150;
N120 G99 G84 X35 Y0 Z-15 R10 P300;   攻螺纹至尺寸
N125 X0 Y-35;
N130 X-35 Y0;
N135 G98 X0 Y35;
N140 G00 X200 Y200 M05;
N145 M30;
```

3.6 应用刀补进行轮廓编程

相关知识点

数控加工中的刀具补偿主要有刀具半径补偿和刀具长度补偿，使用刀具半径补偿功能可将按刀心轨迹编程转变为按工件轮廓进行编程，这样省去了刀心轨迹的人工计算，不仅简化了编程还提高了程序的准确度；使用刀具长度补偿（只对于二坐标和三坐标联动数控加工有效，对四坐标、五坐标联动数控加工无效）功能可将按刀具长度定位基准点编程转变为按刀尖或刀心进行编程，同样简化了编程，提高了准确度。

用刀具补偿可以实现同一程序、同一刀具的粗加工和精加工，补偿方法为：设刀具半径为 r，精加工余量为Δ。粗加工时，输入刀具直径 D=2（r+Δ），完成粗加工；精加工时，同一程序、同一刀具只需输入刀具直径 D=2r，完成精加工。若还需半精加工，只要定好半精加工余量，也可效仿此法。

例 1：平面轮廓零件的加工

按图 3-25 中点画线所示进给路线应用刀补编写加工程序。

图 3-25　平面零件刀补编程

程序如下：

```
%O301;
N05 G21 G54 G80 G90;            程序初始化
N10 X150 Y160 Z40;              对刀点
N15 M03 S100 F100;
N20 X100 Y60;                   起始点
N20 G01 Z-20;                   下刀
N15 G01 G42 D02 X75 Y60;        开始切入工件
N20 X35;                        加工直线段
N20 G02 X15 Y60 R10;            加工 R10mm 的圆弧
N25 G01 X15 Y70;
N30 G03 X-15 Y70 R15;           加工 R15mm 的圆弧
N35 G01 X-15 Y60;
N40 G02 X-35 Y60 R10;           加工 R10mm 的圆弧
N45 G01 X-75 Y60;
N50 G01 X-75 Y0;                加工左直边
N55 G01 X45 Y0;                 加工下直边
N60 G01 X75 Y20;                加工斜边
N65 G01 X75 Y70;                加工右直边
N70 G00 G40 X150 Y60;           取消刀补，回到对刀点
N75 Z40 M05;                    抬刀
N80 M02;
```

例 2：内、外轮廓零件的加工

如图 3-26 所示，零件外轮廓深度为 5mm，内轮廓：5mm 深的矩形槽，10mm 深的方形槽，4 个ϕ5mm 的深孔。试确定工艺方案及编写加工程序

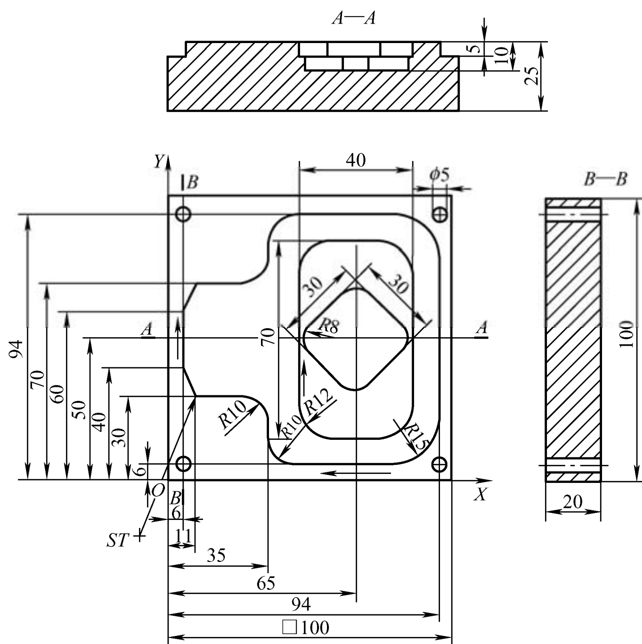


图 3-26　平面零件刀补编程

1. 工艺方案分析

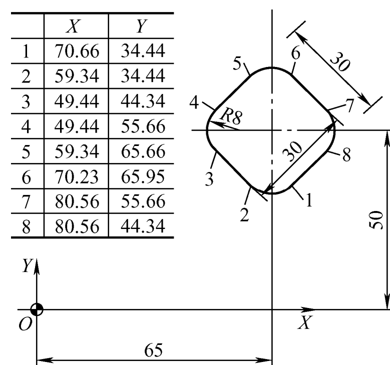
1）原点设定：Z 向程序原点位于上表面，Y 向和 X 向程序原点位于工件左下角 O 点。

2）刀具选用ϕ18mm 立铣刀，ϕ20mm 和ϕ14mm 的键槽铣刀。

3）安全面高度为 20mm。

4）孔的长径比为 4，孔比较深，用 G83 指令钻孔。

5）方形槽坐标及进给路线 1→2→…→8→1 如图 3-27 所示。



	X	Y
1	70.66	34.44
2	59.34	34.44
3	49.44	44.34
4	49.44	55.66
5	59.34	65.66
6	70.23	65.95
7	80.56	55.66
8	80.56	44.34

图 3-27　方形槽坐标及进给路线

2. 加工程序

加工程序如下：

```
N05 G54 G40 G49 G80 X0 Y0 Z20;
N10 M06 T01;                      换φ18mm 立铣刀加工外轮廓
N15 G00 G90 X-30 Y-60 M03 S800;   起刀点
N20 G43 H01 Z5;                   1 号刀，长度补偿
N25 S800 F250 M08;
N30 G01 Z-5;                      下刀
N35 G41 X11 Y30 D01;              建立刀具补偿并切入工件
N40 X6 Y40;                       加工斜线
N45 Y60;
N50 X11 Y70;                      加工斜线
N55 G01 X25 Y70;
N60 G03 X35 Y80 I0.0 J10;         加工 R10mm 圆弧
N65 G01 Y84;
N70 G02 X45 Y94 I10 J0.0;         加工 R10mm 圆弧
N75 G01 X79;
N80 G02 X94 Y79 I0.0 J-15;        加工 R15mm 圆弧
N85 G01 Y21;
N90 G02 X79 Y6 I-15 J0.0;         加工 R15mm 圆弧
N95 G01 X45;
N100 G02 X35 Y16 R10;             加工 R10mm 圆弧
N105 G01 X35 Y20;
N110 G03 X25 Y30 R10;             加工 R10mm 圆弧
N115 G01 X0 Y30;
N120 G40 X-30 Y-60;               取消刀补，回到起点
N125 G00 Z40 M05;                 抬刀
N130 M06 T02;                     换φ20mm 的键槽铣刀
N135 G90 G00 Z40;
N140 G43 H02 X65 Y50 Z5;          长度补偿
N145 S600 F250 M03;
N150 G01 Z-5;                     下刀
N155 G41 X65 Y15 D02;             完成刀具半径补偿，并切入矩形槽下方
N160 X57;
N165 G02 X45 Y27 I0 J12;          加工 R12mm 圆弧
N170 G01 X45 Y73;
N175 G02 X57 Y85 R12;             加工 R12mm 圆弧
```

```
N180 G01 X73 Y85;
N185 G02 X85 Y73 R12;                  加工 R12mm 圆弧
N190 G01 X85 Y27;
N195 G02 X73 Y15 I-12 J0;              加工 R12mm 圆弧
N200 G01 Y65;
N205 G00 Z40;                          抬刀
N210 M05
N215 M06 T03;                          换φ14mm 的键槽铣刀
N220 G00 Z100 H03 M03 S1000;           长度补偿
N225 G43 H02 X65 Y50 Z5;
N230 G01 Z-5 F250;                     下刀
N235 G42 X70.66 Y34.44 D03;            右补，刀具到达 1 点
N240 G02 X59.34 Y34.44 R8;             到达 2 点，加工 R8mm 圆弧
N250 G01 X49.44 Y44.34;                到达 3 点，加工斜边
N260 G02 X49.44 Y55.66 R8;             到达 4 点，加工 R8mm 圆弧
N265 G01 X59.34 Y65.56;                到达 5 点，加工斜边
N270 G02 X70.23 Y65.56 R8;             到达 6 点，加工 R8mm 圆弧
N275 G01 X80.56 Y55.66;                到达 7 点，加工斜边
N280 G02 X80.56 Y44.34 R8;             到达 8 点，加工 R8mm 圆弧
N285 G01 X70.66 Y34.44;                到达 1 点，加工斜边
N290 G01 G40 X65 Y50;
N295 G00 Z20;
N300 Z40;
N305 X100 Y100;
N310 M06 T04;                          换φ5mm 的钻头
N315 G43 H02 Z5;                       长度补偿
N320 S600 F50 M03;
N325 G99 G83 X6 Y6 Z-22 R5 Q7 P2000 K1;
N330 X6 Y94;
N335 X94 Y94;
N340 G98 X94 Y6;                       深孔加工结束
N345 G00 Z100 M05;                     抬刀
N350 M30;
```

3.7　固定循环编程

相关知识点

反镗循环也称背镗循环，指令动作如图 3-28 所示。背镗刀定位到待镗孔的正上方，主轴定向停止，沿刀尖的相反方向进行刀具偏移，偏移量由参数 Q 设定。

格式为：

G98 G87 X_ Y_ Z_ R_ Q_ P_ F_ K_;

基本动作为：

1）镗刀快速定位到镗孔加工循环起始点 B（X，Y）。

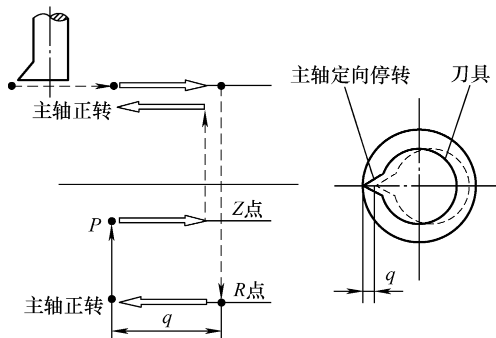


图 3-28　反镗循环

2）主轴准停、刀具沿刀尖的反方向偏移。

3）快速移动到孔底位置。

4）刀尖正方向偏移回加工位置，主轴正转。

5）刀具向上进给，到参考平面 *R*。

6）主轴准停，刀具沿刀尖的反方向偏移 Q 值。

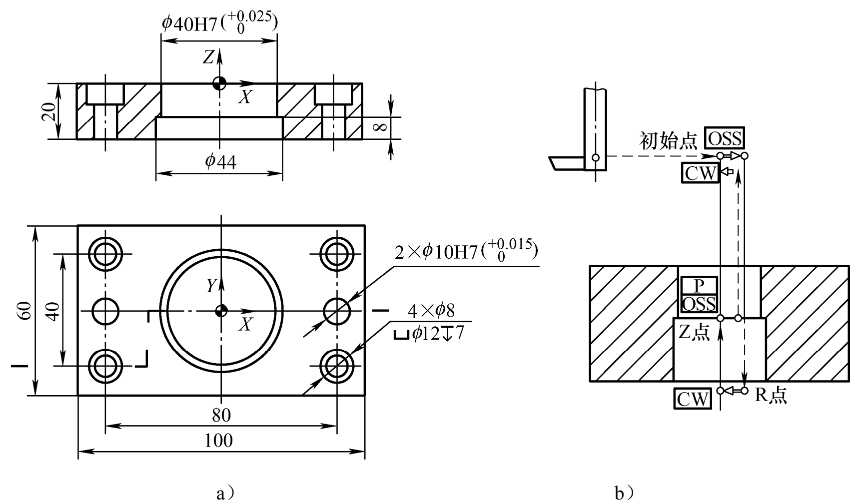
7）镗刀快速退出到初始平面 *B*。

8）沿刀尖正方向偏移。

例 1：孔加工固定循环

使用立式加工中心加工图 3-29 所示零件上的各个孔，编写加工程序。

零件如图 3-29a 所示，零件外轮廓深度为 20mm，零件内外轮廓分两层：8mm 深的止口圆，4 个ϕ12mm×7mm 的沉孔，4 个ϕ8mm 的深孔，试确定工艺方案及编写加工程序。



a）　　b）

图 3-29　孔加工固定循环

a）零件图　b）反镗循环

1. 工艺方案分析

1）原点设定：*Z* 向程序原点位于上表面，*Y* 向和 *X* 向程序原点位于工件左下角 *O* 点。

2）刀具选用ϕ18mm 立铣刀，ϕ20mm 和ϕ14mm 的键槽铣刀。

3）安全面高度为 20mm。

4）孔的长径比为 4，孔比较深，用 G83 指令钻孔。

5）反镗ϕ44mm 孔，如图 3-29b 所示。

零件各工步的内容、所用刀具及切削用量见表 3-9。

表 3-9　孔加工工步内容及工艺参数　　（单位：mm）

序号	工步内容	刀具名称	刀号	刀补	进给速度	进给量
1	用中心钻定各孔位置	A2.5 中心钻	T01	H01	20	0.1
2	钻ϕ8 孔	ϕ8 麻花钻	T02	H02	20	0.15

（续）

序　　号	工 步 内 容	刀 具 名 称	刀　　号	刀　　补	进 给 速 度	进　给　量
3	钻ϕ10H7、ϕ40H7、ϕ44 孔至ϕ9.5	ϕ9.5 麻花钻	T03	H03	20	0.2
4	扩钻ϕ40H7 孔至ϕ38	ϕ38 麻花钻	T04	H04	30	0.3
5	锪钻ϕ12 沉孔，深 7	锪钻ϕ12	T05	H05	20	0.15
6	精镗ϕ40H7 通孔	镗刀ϕ40H7	T06	H06	60	0.15
7	背镗ϕ44 孔至尺寸	背镗刀ϕ44	T07	H07	60	0.15
8	铰ϕ12 孔至尺寸	机铰刀ϕ10H7	T08	H08	20	0.2

2. 编制加工程序

程序如下：

```
%O2607;
N05 G40 G49 G54 G80 G90;
N10 G91 G28 Z0 T01;
N15 M06 T01;                           换中心钻
N20 G90 G00 X200 Y200;
N25 M03 S800 M08;
N30 G43 Z100 H01 F80;                  刀具长度补偿
N35 G99 G82 X40 Y20 Z-5 R5 P300;       钻孔循环，孔底延时 0.3s
N40 Y0;
N45 Y-20;
N50 X-40;
N55 Y0;
N60 Y20;
N65 G98 X0 Y0;
N70 G80 G49;
N75 G91 G28 Z0;
N80 M06;                               换φ8mm 麻花钻
N85 G90 G00 X200 Y200 T03;
N90 M03 S750;
N95 G43 Z200 H02 M08;                  刀具长度补偿
N100 G99 G81 X40 Y20 Z-25 R5 F120;     钻φ8mm 通孔
N105 Y-20;
N110 X-40;
N115 G98 Y20;
N120 G80 G49;
N125 G91 G28 Z0;
N130 M06;                              换φ9.5mm 麻花钻
N135 G90 G00 X200 Y200 T04;
N140 M03 S750;
N145 G43 Z200 H03 M08;                 刀具长度补偿
N150 G99 G80 X40 Y0 Z-25 R5 F150;      钻φ10H7 底孔及中心底孔
N155 X0;
N160 G98 X-40;
N165 G80 G49;
N170 G91 G28 Z0;
```

```
N175 M06;                                      换φ38mm 麻花钻
N180 G90 G00 X200 Y200 T05;
N185 M03 S260;
N190 G43 Z100 H04 M08;                         刀具长度补偿
N195 G98 X0 Y0 Z-35 R5 F80;                    扩钻φ40H7 孔至φ38mm
N200 G80 G49;
N205 G91 G28 Z0;
N210 M06;                                      换锪钻φ12mm
N215 G90 G00 X200 Y200 T06;
N220 M03 S500;
N225 G43 Z200 H05 M08;                         刀具长度补偿
N230 G99 G81 X40 Y20 Z-7 R5;                   锪φ12mm 沉孔
N235 Y-20;
N240 X-40;
N245 G98 Y20;
N250 G80 G49;
N255 G91 G28 Z0;
N260 M06;                                      换φ40H7 镗刀
N265 G90 G00 X200 Y200 T07;
N270 M03 S450;
N275 G43 Z100 H06 M08;                         刀具长度补偿
N280 G98 G85 X0 Y0 Z-25 R5 F70;                精镗φ40H7 孔
N285 G80 G49;
N290 G9l G28 Z0;
N295 M06;                                      换φ44mm 背镗刀
N300 G90 G00 X200 Y200 T08;
N305 M03 S450;
N310 G43 Z100 H07 M08;                         刀具长度补偿
N315 G98 G87 X0 Y0 Z-12 R-25 Q2.5 P1000 F70;
                                               反镗φ44mm 孔
N320 G80 G49;
N325 G91 G28 Z0;
N330 M06;                                      换φ10H7 机用铰刀
N335 G90 G00 X200 Y200 T01;
N340 M03 S600;
N345 G43 Z100 H08 M08;                         刀具长度补偿
N350 G99 G85 X20 Y0 Z-5 F120;                  铰φ10H7 孔
N355 G98 X-20;
N360 G80 G49;
N365 G91 G28 Z0;
N370 M30;
```

适合于反镗孔的情况很多，如图 3-30 所示箱体中的φ30mm 的孔，采用反镗加工方案，刀杆刚性好、加工质量和效率较高。采用图示 *B* 方向进刀，φ25mm 孔加工完成后，在卧式数控镗床上加工，工作台不回转，换反镗刀后同样从 *B* 方向进刀，采用反镗孔的方法加工φ30mm 孔。其中一个孔的加工程序片段如下：

```
…
N10 G00 G90 X0 Y0 S400 M03;
N15 G43 H1 Z100;
N20 G98 G87 X210 Y100 Z-50 R-20 Q3 P1 F100;
```

```
N25 G80;
…
```

图 3-30　适用于反镗加工的孔

例 2：支承块的加工

图 3-31 所示为支承块零件，其毛坯为 100mm×80mm×27mm 的方形坯料，材料为 45 钢，且底面和四个轮廓面均已加工好，要求在立式加工中心上加工顶面、孔及沟槽。

图 3-31　支承块零件

1．工艺方案分析

支承块的加工程序分两部分，一部分是顶面、ϕ60mm 沉孔及沟槽的加工程序，另一部分是除ϕ60mm 沉孔以外的各孔加工程序。支承块加工工艺方案及所用刀具见表 3-10。零件装夹与零点设定如图 3-32 所示，工件顶面铣削的刀具运动轨迹如图 3-33 所示，铣ϕ60mm 沉孔及沟槽如图 3-34 所示。

表 3-10　支承块加工工艺方案及所用刀具　　（单位：mm）

序　号	工 艺 内 容	刀　号	刀 具 特 点
1	粗、精铣顶面	T01	ϕ125mm 端面铣刀
2	预钻ϕ32mm 通孔至ϕ25mm	T02	ϕ25 麻花钻
3	粗铣ϕ60mm 沉孔及沟槽	T03	ϕ18mm 键槽铣刀，两刃
4	钻ϕ32mm、ϕ12mm 孔的中心孔	T04	ϕ2mm 中心钻
5	钻 4×M8 底孔至ϕ6.8mm	T05	ϕ6.8mm 麻花钻
6	攻 4×M8 螺纹	T06	M8 丝锥
7	铰ϕ12mm 孔至尺寸要求	T07	ϕ12mm 铰刀
8	粗镗ϕ32mm 孔至ϕ31.7mm	T08	ϕ31.7mm 镗刀
9	精镗ϕ32mm 孔至尺寸要求	T09	ϕ32mm 微调精镗刀
10	精铣ϕ60mm 沉孔	T10	ϕ20mm 键槽铣刀

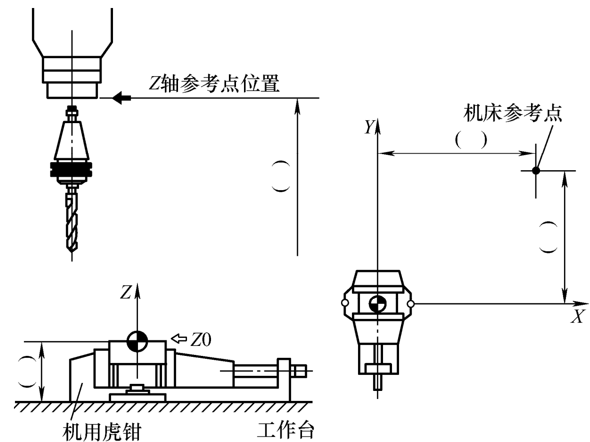
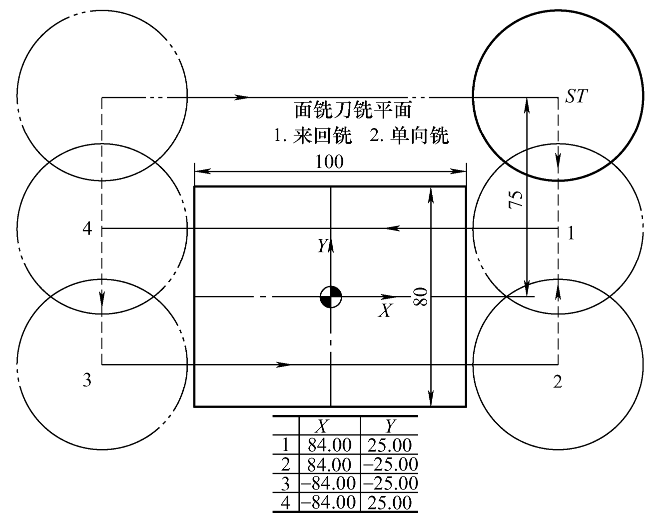
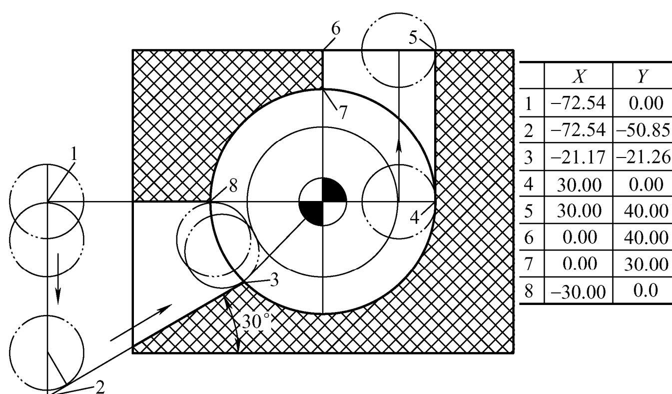


图 3-32　零件装夹与零点设定



	X	Y
1	84.00	25.00
2	84.00	−25.00
3	−84.00	−25.00
4	−84.00	25.00

图 3-33　工件顶面铣削的刀具运动轨迹



	X	Y
1	−72.54	0.00
2	−72.54	−50.85
3	−21.17	−21.26
4	30.00	0.00
5	30.00	40.00
6	0.00	40.00
7	0.00	30.00
8	−30.00	0.0

图 3-34　铣 ϕ60mm 沉孔及沟槽

2. 程序编制

（1）顶面、沉孔及沟槽的加工程序

```
% O1010;
N05 G17 G90 G40 G80 G49 G21;        粗铣顶面（φ63mm 端面铣刀，采用非对称铣）
N10 G91 G28 Z0,;
N15 M06 T01;
N20 G90 G54 G00 X84 Y25;            走到 1 点
N25 M03 S240;
N30 G43 Z100 H01;
N35 Z0.5;                           下刀
N40 G01 X-84 F300;                  走到 4 点
N45 X-84 Y-25;                      走到 3 点
N50 X84 Y-25;                       走到 2 点，粗加工完毕
N55 G00 Z100 M05;
N60 G91 G28 Z0 M05;
N65 M00;                            程序选停
N70 M06 T01;                        精铣顶面
N75 G90 G54 G00 X84 Y75;
N80 M03 S320;
N85 G43 Z100 H01;
N90 Z0;
N95 G00 X-84 Y25;                   走到 1 点
N100 G01 X-84 F300;                 走到 4 点
N105 G00 X-84 Y75;                  完成第一刀精加工
N110 G00 X84 Y75;                   走到起点 ST
N115 G01 X-84 Y-25;                 到 2 点
N120 G01 X-84 Y-25 F300;            走到 3 点
N125 G00 X-84 Y75;                  完成第二刀精加工
N130 G00 X84 Y75 M05;               到起点 ST
N135 G00 Z100;
N140 G91 G28 Z0 M05;
N145 M00;                           程序选停
N150 M06 T11;                       预钻φ32mm 通孔至φ25mm
```

```
N155 G90 G54 G00 X0 Y0;
N160 M03 S460;
N165 G43 Z5 H11;
N170 G01 Z-28 F80;                      钻孔
N175 G00 Z100;
N180 G91 G28 Z0 M05;
N185 M00;                               程序选停
N190 M06 T06;                           粗铣φ60mm 沉孔及沟槽
N195 G90 G54 G00 X-72 54 Y0;            走到起刀点 1
N200 M03 S370;
N205 G43 Z5 H06;
N210 G01 Z-10 F800;
N215 G41 D06 X-72.54 Y-50.85 F1000;     导入 D06 半径补偿并为精加工半径留余量 0.05mm.
N220 X-21.17 Y-21.26 F600;              加工斜线，走到 3 点
N225 G03 X30 Y0 R30;                    加工圆弧，走到 4 点
N230 G01 X30 Y40;                       加工直线，走到 5 点
N235 G01 X0 Y40;                        加工直线，走到 6 点
N240 G01 X0 Y30;                        加工直线，走到 7 点
N245 G03 X-30 Y0 R30;                   加工圆弧，走到 8 点
N250 G01 X-45 Y0;                       加工直线，走出工件
N255 G00 G40 X-72.54 Y0;                回到起刀点 1，取消刀补
N260 M06 T06;                           换刀，精铣φ60mm 沉孔及沟槽
N265 G90 G54 G00 X-72.54 Y0.;           走到起刀点 1
N270 M03 S370;
N275 G43 Z5 H06;
N280 G01 Z-10 F800;
N285 G41 D06 X-72.54 Y-50.85 F1000;
N290 X-21.17 Y-21.26 F600;              加工斜线，走到 3 点
N295 G03 X30 Y0 R30;                    加工圆弧，走到 4 点
N300 G01 X30 Y40;                       加工直线，走到 5 点
N305 G01 X0 Y40;                        加工直线，走到 6 点
N310 G01 X0 Y30;                        加工直线，走到 7 点
N315 G03 X-30 Y0 R30;                   加工圆弧，走到 8 点
N320 G01 X-45 Y0;                       加工直线，走出工件
N325 G00 G40 X-72.54 Y0;                回到起刀点
N330 M30;
```

相关知识点

钻孔时，刀具下移动到参考点 *R*，并沿刀尖方向进行刀具偏移，同时主轴正转，开始以进给速度 F 反镗孔，至 *Z* 点时，主轴再次定向停止，在此处也可用 P 参数设置延时，接着进行刀具偏移，刀尖离开已镗孔壁，快速向上退回到起始点高度，进行最后一次刀具偏移，返回起始点，同时主轴正转，准备执行其他后续指令。

（2）孔加工程序

铣ϕ60mm 沉孔及沟槽如图 3-34 所示，加工各孔运动轨迹、所用刀具及相关尺寸计算见如图 3-35 所示。

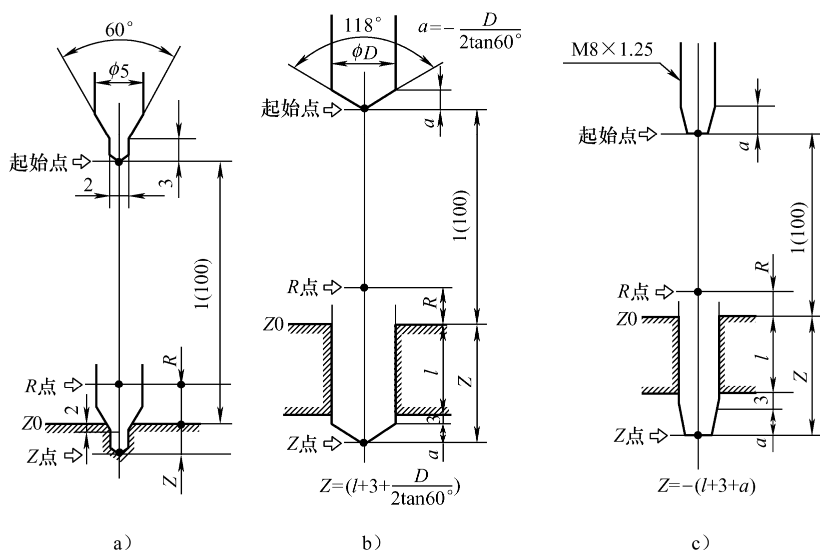


图 3-35　加工孔运动轨迹与计算

a）中心钻定孔位　b）钻孔深度尺寸计算　c）攻螺纹深度尺寸计算

% O1011；	
N05 M06 T02；	钻ϕ12mm 孔的中心孔
N10 G90 G54 G00 X0 Y0；	
N15 M03 S1000；	
N20 G43 Z100 H02；	
N25 Z-5 R5 F100；	
N30 G99 G81 X-36 Y26；	
N35 G98 X36 Y-26；	
N40 G80 G91 G28 Z0 M05；	
N45 M00；	
N50 M06 T03；	钻ϕ12mm 孔至ϕ11.5mm
N55 G90 G54 G00 X0 Y0；	
N60 M03 S550；	
N65 G43 Z100 H03；	
N70 Z-30 R5 F110；	
N75 G99 G81 X-36 Y26；	
N80 G98 X36 Y-26；	
N85 G80 G91 G28 Z0 M05；	
N90 M00；	
N95 M06 T05；	钻ϕ6mm 孔至尺寸
N100 G90 G54 G00 X40 Y0；	
N105 M03 S1000；	
N110 G43 Z100 H05；	
N115 G99 G81 Z-15 R5 F220；	
N120 Y15；	
N125 G98 Y30；	
N130 G80 G91 G28 Z0 M05；	
N135 M00；	
N140 M06 T07；	钻 4×M8 底孔至ϕ6.8mm

```
N145 G90 G54 G00 X23 Y0;
N150 M03 S950;
N155 G43 Z100 H07;
N160 G98 G81 Z-30 R5 F140;
N165 X0 Y23;
N170 X-23 Y0;
N175 G98 X0 Y-23;
N180 G80 G91 G28 Z0 M05;
N185 M00;
N185 M06 T12;                      攻4×M8螺纹
N190 G90 G54 G00 X23 Y0;
N195 M03 S320;
N200 G43 Z100 H12;
N205 G98 G84 Z-27 R10 F400;
N210 X0 Y23;
N215 X-23 Y0;
N220 X0 Y-23;
N225 G80 G91 G28 Z0;
N230 G28 X0 Y0;
N235 M06 T09;                      铰φ12mm孔至尺寸
N240 G90 G54 G00 X0 Y0 Z100;
N245 M03 S170;
N250 G43 Z20 H09;
N255 Z-30 R5;
N260 G99 G82 X-36 Y26 P1000 F42;
N265 G98 X36 Y-26;
N270 G80 G91 G28 Z0 M05;
N275 M00;
N280 M06 T08;                      扩孔φ32孔至φ30
N285 G90 G54 G00 X0 Y0;
N290 M03 S830;
N295 G43 Z100 H08;
N300 G98 G81 Z-27 R5 F120;
N305 G80 G91 G28 Z0 M05;
N310 M06 T08;                      粗镗φ32mm孔至φ31.7mm
N315 G90 G54 G00 X0 Y0;
N320 M03 S830;
N325 G43 Z100 H08;
N330 G98 G76 Z-27 R5 Q0.1 F120;
N335 G80 G91 G28 Z0 M05;
N340 M00;
N345 M06 T10;
N350 G90 G54 G00 X0 Y0;
N355 M03 S940;
N360 G43 Z100 H10;
N365 G98 G76 Z-27 R5 Q0.1 F75;
N370 G80 G91 G28 Z0 M05;
N375 M00;
N380 M06 T11;                      用φ20mm键槽铣刀精铣φ60mm沉孔
N385 G90 G54 G00 X0 Y0;
```

```
N390 M03 S460;
N395 G43 Z5 H11;
N400 G01 Z-10 F1000;
N405 G03 X20 Y0 R10 F80;            从 O 到 P 以半圆方式切入工件，无刀补
N410 G03 X20 Y0 I-20 J0;            整圆方式，精铣φ60mm 沉孔
N415 G03 X0 Y0 R10;                 从 P 到 O 以半圆方式切出工件
N420 G00 Z100 M05;
N158 M30;
```

点　评

背镗循环 G87 的返回动作只有 G98 这一种方式，没有 G99 返回方式。偏移量 Q 必须指定为正值，偏置方向在系统参数中设定。主轴定向停止时，镗刀刀尖方向要与设想的方向一致。在刀具安装时，使用 M09 主轴准停进行检查，以免刀具装反。

3.8　坐标变换编程

例 1：扇形接合齿的数控加工

图 3-36 所示为带斜面凹槽的端面扇形接合齿离合器，试编写其数控加工程序。

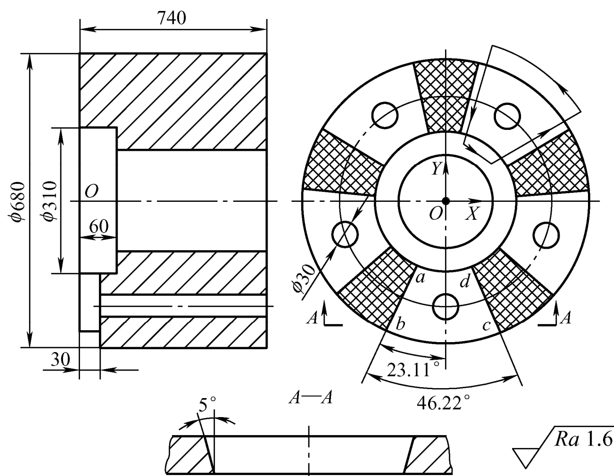


图 3-36　带斜面凹槽的端面扇形接合齿离合器

1. 加工工艺分析

离合器的种类很多，其端面扇形接合齿截面形状各异，所要求的加工精度也不一样，但它们都以凹槽侧面为工作面，其正面视图均为圆周均布的扇形槽，但凹槽的两侧面不同，常见的有两侧面为直面、两侧面为斜面。直面凹槽的加工精度要求低，而斜面凹槽加工精度要求高，各类离合器上的端面扇形接合齿以往都是在铣床上加工的，工序复杂，工人劳动强度大，需要设计和制造专用工装及样板，且加工精度不易保证。随着数控技术的推广应用，现采用数控机床加工各类离合器的端面扇形接合齿，由于零件属轴类零件，其端面及内、外圆等先在立或车床上车削加工到符合零件图样要求（简称“符图”），然后再采用

FANUC 系统ϕ160mm 数控镗铣床加工其扇形凹槽，工效提高了十几倍，精度也得到了可靠的保证，取得了很好的效果。现以斜面凹槽的端面扇形接合齿离合器为例进行工艺方法与编程分析。

2. 工件的装夹

工件放在 V 形铁上，使加工平面位于机床的 *OXY* 坐标平面内，*Z* 轴为刀具轴，由于零件加工部位呈圆周均布的特征，坐标零点设在工件中心点和端面上，工件关于 *Y* 轴对称布置，如图 3-37 所示。*X* 轴正向为起始边，工件内圆半径为 *R*155mm、外圆半径为 *R*340mm，刀具直径确定为ϕ80mm，工件在落地数控镗床上加工，该机床是 FANUC 数控系统，机床具有刀补功能，只需按工件的实际轮廓编程即可，设计进给路线时，须考虑切入切出的行程。

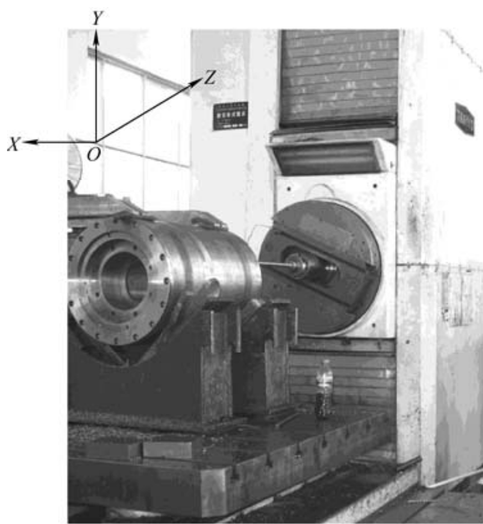


图 3-37　端面扇形接合齿的坐标设定及装夹

3. 扇形接合齿编程思路分析

能否编制一种既简便易行又对类似工件有一定通用性的程序呢？根据机床数控系统功能，采用了极坐标线性内插补及参数功能编程。通过实践证明，采用这种功能编制程序来加工各类型的扇形端面接合齿，其程序简便，使用参数少，不需要计算，不易出错，且具有一定的通用性。

加工程序中，在工件圆心处给定长度及半径刀具补偿后，刀具以坐标零点为极心，极坐标快速移动到 *a* 点，*a* 点的极半径设定要小于工件内圆半径 *R*155mm，以防刀具撞击工件，造成安全事故。

4. 设计合理的进给路线

合理的进给路线可以保证加工质量，提高生产率，已知工件的内圆半径为 *R*155mm，刀具直径为 *D*，那么 *a* 点的极半径值为 155mm−*D*/2。刀具从 *O* 点出发，按极坐标方式，进给到达 *a* 点，由 *a* 点到 *b* 点，再由 *b* 点到 *c* 点、*d* 点，如图 3-37 所示。极半径值的确定比较灵活，可根据工件外圆半径尺寸、刀具半径来确定，如果工件外圆半径尺寸较大，刀具半径相对较小，这时扇形凹槽的外部边缘处有可能出现剩余部分，所以 *b* 点的极半径值大于（或等于）工件外圆半径尺寸较好，以能加工到扇形凹槽的最边缘为准，这样既可避免工件上有剩余部分，还可缩短进给路线，节约进给时间。

5. 刀具选用

粗、精加工程序一样，只是刀具尺寸及刀具形状不一样，粗加工用ϕ80mm 玉米铣刀，先加工出直槽来，同时要考虑切入与切出段距离，现分别设定为 6mm。由于扇形凹台的外径、中径、根径和斜角尺寸精度要求较高，精加工时采用斜度与凹槽侧面相一致的成形锥度铣刀加工，即用锥度为 5° 的ϕ63mm 成形锥度铣刀。

6. 扇形齿槽粗加工子程序

程序如下：

```
%O087;                    扇形齿槽粗加工子程序名
N05 G00 X0 Y0;            到达坐标原点
```

```
N10 G52 X34 Y0；                    G52 局部坐标，定义为极坐标原点
N15 G01 G16 X0 Y0；                 到达起点，G16 为极坐标编程，X 为半径，Y 为角度
N20 G41 D02 G01 X149 Y270-23.11；   到达 a 点（149=155−6），完成刀补
N25 G01 X346 Y270-23.11；           到达 b 点，346=340+6
N30 G01 X346 Y270+23.11；           到达 c 点
N35 G01 X149 Y270+23.11；           到达 d 点
N40 G01 G40 X75 Y0；                取消极坐标及刀补并回达起点
N50 M99；                           粗加工子程序结束
```

7. 粗加工主程序

程序如下：

```
% O1010；
N05 G17 G90 G40 G80 G49 G21；
N10 G91 G28 Z0；
N15 M06 T01；
N20 G90 G54 G00 X84 Y25；           走到 1 点
N25 M03 S240 F100；
N30 M98 P871；                      调用子程序 O087 加工第一个齿槽
N35 G68 X0 Y0 R72；                 坐标系和齿槽整体旋转 72°
N40 M98 P871；                      加工第二个齿槽
N45 G68 X0 Y0 R144；                坐标系和齿槽整体旋转 144°
N50 M98 P871；                      加工第三个齿槽
N55 G68 X0 Y0 R216；                坐标系和齿槽整体旋转 216°
N60 M98 P871；                      加工第四个齿槽
N65 G68 X0 Y0 R288；                坐标系和齿槽整体旋转 288°
N70 M98 P871；                      加工第五个齿槽
N75 G90 G00 Z100；                  抬刀
N80 M30；                           扇形接合齿槽粗加工结束
```

8. 扇形接合齿（直槽）精加工

精加工时进给路线如图 3-38a 所示，其顶部直径要经调刀仪精确测定出来，由此算出加工凹槽时中径位置的刀具半径，这个中径位置的刀具半径即为刀具半径补偿值，刀具是不带锥度的ϕ63mm 螺旋齿精铣刀。

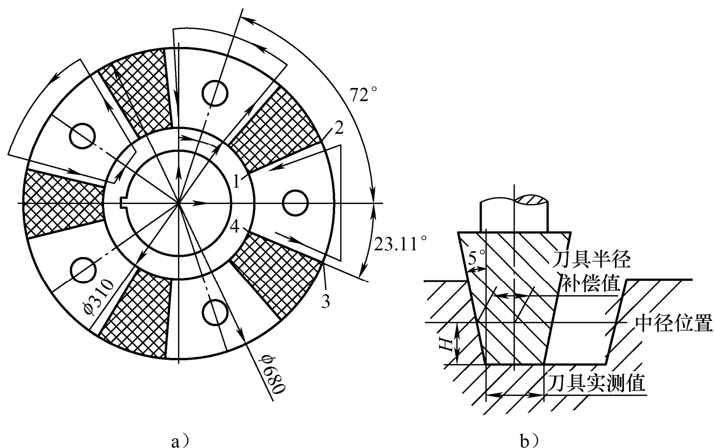


图 3-38　进给路线与成形锥度铣刀

精加工子程序如下：

```
%O88;                               精加工子程序名
N05 G00 X0 Y0;                      到达坐标原点
N10 G01 G16 G41 D02 X155 Y-23.11;   G16 极坐标编程，到达 4 点，完成刀补
N15 G01 X340 Y-23.11;               到达 3 点
N20 G01 X340 Y23.11;                到达 2 点
N25 G01 X121 Y23.11;                到达 1 点
N30 G00 G40 X0 Y0;                  取消刀补，回到原点达
N35 M99;                            精加工子程序结束
```

精加工主程序如下：

```
% O1011;                            精加工主程序名
N05 G17 G90 G40 G80 G49 G21;
N10 G91 G28 Z0;
N15 M06 T02;                        选用不带锥度的φ63mm 螺旋齿精铣刀
N20 G90 G54 G00 X84 Y25;            走到 1 点
N25 M03 S900 F200;
N30 M98 P881;                       调用子程序 O88 加工第一个齿槽
N35 G68 X0 Y0 R72;                  坐标系统和齿槽整体旋转 72°
N40 M98 P881;                       加工第二个齿槽
N45 G68 X0 Y0 R144;                 坐标系统和齿槽整体旋转 144°
N50 M98 P881;                       加工第三个齿槽
N55 G68 X0 Y0 R216;                 坐标系统和齿槽整体旋转 216°
N60 M98 P881;                       加工第四个齿槽
N65 G68 X0 Y0 R288;                 坐标系统和齿槽整体旋转 288°
N70 M98 P881;                       加工第五个齿槽
N75 G90 G00 Z100;                   抬刀
N80 M30;                            扇形接合齿槽精加工结束
```

9. 锥度铣刀精铣斜面凹槽工作面

斜面凹槽工作面的精加工用ϕ5mm 的 50° 锥度铣刀，其扇形凹台的外径、中径、根径和斜角尺寸精度要求较高，上述子程序仍然适用，精加工时采用斜度与凹槽侧面相一致的成形角度铣刀加工，成形铣刀的顶部直径要经调刀仪精确测定出来，由此算出加工凹槽时中径位置的刀具半径，如图 3-38b 所示。这个中径位置的刀具半径即为刀具半径补偿值。

```
% O1012;                            精铣斜面凹槽工作面主程序
N05 G17 G90 G40 G80 G49 G21;
N10 G91 G28 Z0;
N15 M06 T03;                        选用φ5mm 的 50° 锥度铣刀
N20 G90 G54 G00 X84 Y25;            走到 1 点
N25 M03 S1200 F100;
N30 M98 P881;                       调用子程序 O88 加工第一个齿槽
N35 G68 X0 Y0 R72;                  坐标系统和齿槽整体旋转 72°
N40 M98 P881;                       加工第二个齿槽
N45 G68 X0 Y0 R144;                 坐标系统和齿槽整体旋转 144°
N50 M98 P881;                       加工第三个齿槽
```

```
N55 G68 X0 Y0 R216;        坐标系统和齿槽整体旋转 216°
N60 M98 P881;              加工第四个齿槽
N65 G68 X0 Y0 R288;        坐标系统和齿槽整体旋转 288°
N70 M98 P881;              加工第五个齿槽
N75 G90 G00 Z100;          抬刀
N80 M30;                   精铣斜面凹槽工作面结束
```

例 2：拉矫机弧形段上底座的数控加工

弧形段上底座是大板坯连铸设备拉矫机上重要的零件，弧形段上底座由弧形段和水平段组成，如图 3-39 所示。

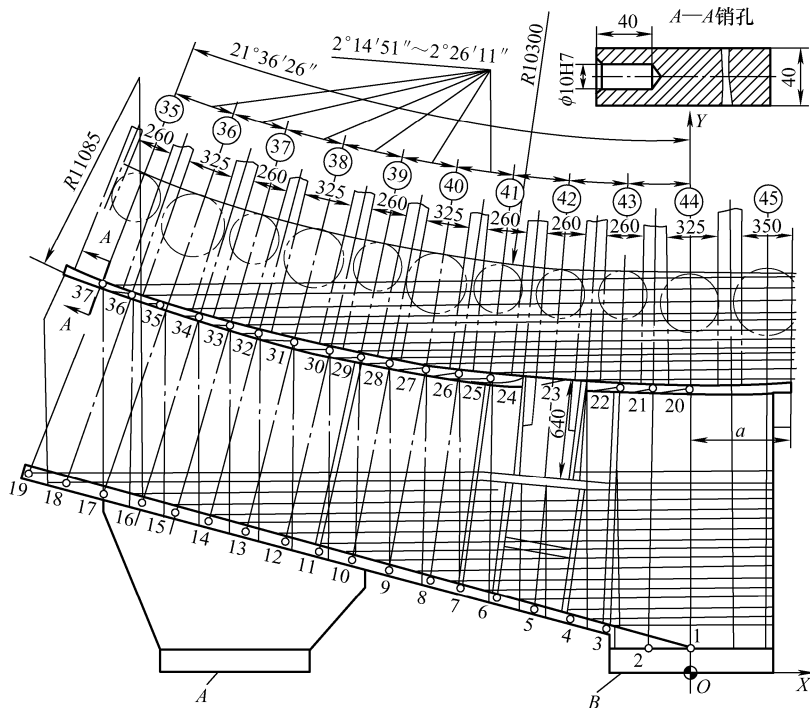


图 3-39　大板坯连铸机弧形段上底座

1．零件构成

弧形段上底座则由机架、上辊压紧装置、下辊调整装置、驱动辊、自由辊五个部分组成，并由自由侧与传动侧两件底座构成拉矫机，弧形段上底座外形尺寸为 5050mm×1015mm×2665mm，毛坯为焊接件，质量为 10845kg。弧形段上底座顶面是由 350mm、325mm、260mm 几种宽度尺寸，9 对 18 个不太明显的折线凸凹折线构成的，如图 3-40 所示，每个折线段平面由一对ϕ20H7 的销孔定位，如图 3-40 中的数字“19，37”“18，36”等，表示其中两对定位销孔，共 37 个定位销孔（其中一个是单一孔）。弧形段所包括的总角度为 21° 36′ 26″，每个折线段所对应的角度在：2° 14′ 51″ ～2° 26′ 11″ 之间调整位置的轴承座是决定拉矫机精度的关键部位，也是加工难度最大、工作量最大的。角度确定各辊子轴承座位置。该零件的加工内容主要有两项：一是加工 37 个定位销孔，二是加工 9 个凹折线段。各点坐标值见表 3-11。

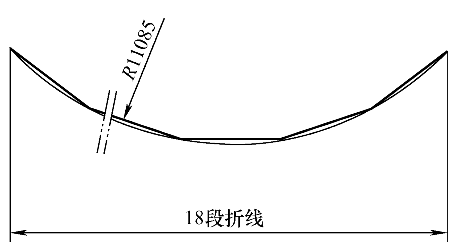


图 3-40　弧形顶面由 9 对不太明显的凸凹折线构成

表 3-11　各点坐标值

坐标点号	X	Y	坐标点号	X	Y	坐标点号	X	Y
1	0	70	20	0	1800.00			
2	−280.28	70	21	−241.07	1802.62			
3	−552.63	188.08	22	−482.02	1810.48			
4	−798.22	253.86	23	−699.12	1858.003	以下为弧形段背面孔坐标点		
5	−1041.87	319.17	单个点的坐标			38	−968.83	1200.10
6	−1283.80	384.00	24	−1348.47	1882.23	39	−4084.86	1134.53
7	−1524.21	448.41	25	−1582.08	1913.48	40	−2011.14	586.92
8	−1783.33	517.84	26	−1814.97	1949.59	41	−1041.87	319.17
9	−2041.14	586.92	27	−2047.05	1990.65	42	0	70
10	−2297.89	655.72	28	−2278.20	2036.63	43	−1524.21	448.41
11	−2553.80	724.29	29	−2508.32	2087.52	44	−968.83	1200.10
12	−2809.12	792.10	30	−2737.31	2143.39	45	−1814.97	1949.59
13	−3064.07	867.01	31	−2965.06	2203.91	46	−3639.85	2414.63
14	−3318.89	929.29	32	−3191.46	2269.36	47	−3064.07	861.01
15	−3573.81	997.60	33	−3416.43	2339.61	48	−237.31	2143.29
16	−3829.95	1065.99	34	−3639.85	2379.93	49	−348.47	1882.32
17	−4084.86	1134.53	35	−3839.85	2414.63			
18	−4341.46	1213.29	36	−3861.63	2494.38			
19	−4599.09	1272.31	37	−4081.66	2578.82			

2. 工艺性分析

弧形段上底座每个平面上都布置有把合孔及定位孔，每段折线平面的几何位置均由两个销孔来控制。这 18 个呈不太明显的折线形布置的平面，如图 3-40 所示。用于把合带锥度向心位置的支柱或下辊部位。每段折线的基准孔每组两个，布置在每一个平面外侧的垂直平分线上，分为两排，距顶面各平面的距离为 20mm 的上排基准孔，包络圆弧半径为 *R*11085mm，基准孔用直角坐标系表示。基准孔是机加、装配、安装、测量的共同基准，因此，基准孔加工是各折线段加工的前提。由于工件刚性差，外侧各基准孔位置变化的可能性大，因此对机床的重复定位精度要求很高。当加工工件内侧 11 个孔时，需要进行第二次装夹，且自由侧与传动侧两件底座又有配对要求，故在加工中要采取措施防止工件变形，并注意找正，提高找

正精度。

3. 各定位销孔的加工

加工 37 个定位销孔，按图 3-41 所示，大板坯连铸机弧形段上底座放在 TK620 落地平台上，各加工孔正对机床主轴，通过中心钻定位、钻孔、铰孔几步完成外侧 19 组 38 孔的加工（内侧 11 个孔的加工本例略去）。

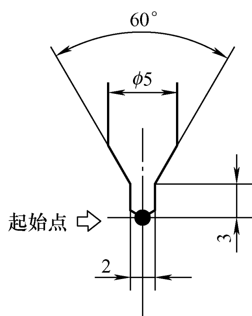


图 3-41　中心钻定孔位

4. 孔加工程序

程序如下：

```
% O1011；                              钻中心孔
N05 M06 T02；                          ϕ2mm 中心钻
N10 G90 G54 G00 X0. Y0.；
N15 M03 S1000；
N20 G43 Z100. H02；
N25 Z-5 R5 F100；
N30 G81；
N35 P551；
N40 G80 G91 G28 Z0. M05；
N45 M00；
N50 M06 T03；                          钻ϕ20H7 孔至ϕ19.8mm
N55 G90 G54 G00 X0. Y0.；
N60 M03 S550；
N65 G43 Z100 H03；
N70 Z-40 R5 F110；
N75 G81；
N80 P551；                             调用各孔坐标子程序
N85 G80 G91 G28 Z0 M05；
N90 M00；
N95 M06 T09；                          铰ϕ20H7 孔至尺寸
N100 G90 G54 G00 X0 Y0 Z100；
N105 M03 S170；
N110 G43 Z20 H09；
N115 Z-40 R5；
N120 G82 F42；
N125 P551；
N130 G80 G91 G28 Z0 M05；
N135 M30；
```

```
%O755;                                      各孔坐标子程序
N05 G99 X0 Y70;
N10 X-280.28 Y70;
N15 X-552.63 Y188.08;
N20 X-798.22 Y253.86;
N25 X-1041.87 Y319.17;
N30 X-1283.80 Y384.00;
N35 X-1524.21 Y448.41;
N40 X-1783.33 Y517.84;
N45 X-2041.14 Y586.92;
N50 X-2297.89 Y655.72;
N55 X-2553.80 Y724.29;
N60 X-2809.12 Y792.10;
N65 X-3064.07 Y867.01;
N70 X-3318.89 Y929.29;
N75 X-3573.81 Y997.60;
N80 X-3829.95 Y1065.99;
N85 X-4084.86 Y1134.53;
N90 X-4341.46 Y1213.29;
N95 X-4599.09 Y1272.31;
N100 X0 Y1800.00;
N105 X-241.07 Y1802.62;
N110 X-482.02 Y1810.48;
N115 X-699.12 Y1858.03;
N120 X-1348.47 Y1882.23;
N125 X-1582.08 Y1913.48;
N130 X-1814.97 Y1949.59;
N135 X-2047.05 Y1990.65;
N140 X-2278.20 Y2036.63;
N145 X-2508.32 Y2087.52;
N150 X-2737.31 Y2143.39;
N155 X-2965.06 Y2203.91;
N160 X-3191.46 Y2269.36;
N165 X-3416.43 Y2339.61;
N170 X-3639.85 Y2379.93;
N175 X-3839.85 Y2414.63;
N180 X-3861.63 Y2494.38;
N185 G98 X-4081.66 Y2578.82;
N190 M99;
```

5. 各折线段的加工

在带 *C* 轴的ϕ200mm 数控落地铣镗床上加工各折线段，如图 3-42 所示。各折线段由单数对孔连线定位，即由 1、3、5、7 等相对应的各孔定位，要加工的各折线段到上排序号 20、22、25 等孔的距离为 20，如图 3-43 所示，上排孔定各折线段位置，对应的下排孔定 *C* 轴（角度铣头）转动的角度，成对孔构成了加工、装配、安装、测量的共同基准，编程时，坐标系的旋转就是通过 *C* 轴（角度铣头）转动的角度来实现 9 个凹折线段（凹槽）的加工，如图 3-43a 所示。折线段凹槽的加工是选用ϕ150mm 三面刃铣刀分两刀完成，如图 3-43b 所示。各折线

段凹槽所对应孔的坐标及连线旋转的角度值见表 3-12。



图 3-42　在带 C 轴的 ϕ200mm 数控落地铣镗床上加工各折线段

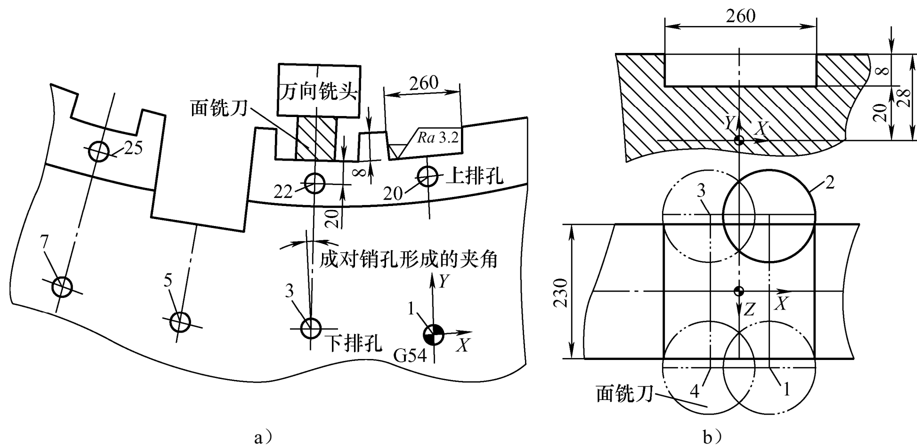


图 3-43　各折线段的加工

表 3-12　各折线段凹槽所对应孔的坐标及连线旋转的角度值

点	X	Y	点	X	Y	成对点的连线与 Y 轴倾斜角度	
1	0	70	20	0	1800.00	0°	
3	−552.63	188.08	22	−482.02	1810.48	2° 14′51″	2.247°
5	单个孔形成的缺口					4° 04′45″	6.126°
7	−1524.21	448.41	25	−1582.08	1913.48	2° 14′51″	8.773°
9	−2041.14	586.92	27	−2047.05	1990.65	2° 14′51″	10.321°
11	−2553.80	724.29	29	−2508.32	2087.52	2° 14′51″	12.868°
13	−3064.07	867.01	31	−2965.06	2203.91	2° 14′51″	14.826°
15	−3573.81	997.60	33	−3416.43	2339.61	2° 14′51″	16.863°
17	−4084.86	1134.53	35	−3839.85	2414.63	2° 14′51″	18.991°
19	−4599.09	1272.31	37	−4081.66	2578.82	2° 14′51″	21.678°

6. 各折线段的加工程序

（1）折线段加工子程序　程序如下：

%O756；	子程序
N05 G01 X40 Z145 Y40；	刀具到达 1 点上方
N10 G01 Y20；	开始加工折线段凹槽
N15 G01 X40 Z-145；	刀具到达 2 点
N20 G01 X-40 Z-145；	刀具到达 3 点
N25 G01 X-40 Z145；	刀具到达 4 点
N30 G00 Y40；	折线段凹槽加工结束
N35 M99；	

（2）折线段加工主程序　程序如下：

% O1010；	带 *C* 轴的ϕ200mm 数控落地铣镗床
N05 G17 G54 G90 G40 G80 G49 G21；	G54 设在孔 1 的中心点上
N10 G91 G28 Z0.；	
N15 M06 T01；	选用ϕ150mm 的三面刃铣刀
N20 G90 G54 G00 X0 Y0 Z200；	G54 定在孔 1 中心点上
N25 M03 S240 F80；	
N30 G52 X0 Y1800.00；	在孔 20 中心点建立局部坐标系，
N35 M98 P056；	调用子程序加工 1（20）孔对应折线段凹槽
N40 G52 X-482.02 Y1810.48；	在孔 22 中心点处建立局部坐标系
N45 G68 X0 Y0 R2.247；	坐标旋转 2.247°
N50 M98 P056；	调用子程序加工 3（22）孔对应折线段凹槽
N55 G52 X-1524.21 Y1913.48；	在孔 25 中心点处建立局部坐标系
N60 G68 X0 Y0 R8.773；	坐标旋转 8.773°
N65 M98 P056；	调用子程序加工 7（25）孔对应折线段凹槽
N70 G52 X-2041.14 Y1990.65；	在孔 25 中心点处建立局部坐标系
N75 G68 X0 Y0 R10.321；	坐标旋转 10.321°
N80 M98 P056；	调用子程序加工 9（27）孔对应折线段凹槽
N85 G52 X-2508.32 Y2087.52；	在孔 29 中心点处建立局部坐标系
N90 G68 X0 Y0 R12.868；	坐标旋转 12.868°
N95 M98 P056；	调用子程序加工 11（29）孔对应折线段凹槽
N100 G52 X-2965.06 Y2203.91；	在孔 31 中心点处建立局部坐标系
N105 G68 X0 Y0 R18.991；	坐标旋转 18.991°
N110 M98 P056；	调用子程序加工 13（31）孔对应折线段凹槽
N115 G52 X-3416.43 Y2339.61；	在孔 33 中心点处建立局部坐标系
N120 G68 X0 Y0 R16.863；	坐标旋转 16.863°
N125 M98 P056；	调用子程序加工 15（33）孔对应折线段凹槽
N130 G52 X-3839.85 Y2414.63；	在孔 35 中心点处建立局部坐标系
N135 G68 X0 Y0 R118.991°；	坐标旋转 18.991°
N140 M98 P056；	调用子程序加工 17（35）孔对应折线段凹槽
N145 G52 X-4081.66 Y 2578.82；	在孔 37 中心点处建立局部坐标系
N150 G68 X0 Y0 R21.678°；	坐标旋转 21.678°
N155 M98 P056；	调用子程序加工 19（37）孔对应折线段凹槽
N160 G52；	取消局部坐标系
N165 G90 G54 G00 X0 Y0 Z200；	回到 G54 坐标系，并远离孔 1 中心点
N170 M30；	程序结束

相关知识点

1．坐标系旋转

格式：

…；

G68 α_ β_ R_ ；　　　　坐标旋转

…；

G69；　　　　取消旋转

其中：

α、β——旋转中心，可用 *XY*、*ZX*、*YZ* 坐标指定，由 G17、G18、G19 决定。

R——旋转角度，逆时针方向为正，如图 3-44 所示。

程序示例：

```
N05 G92 X-50.0 Y-50.0 G69；
N10 G68 X70.0 Y30.0 R60.0；
N15 G90 G01 X0 Y0 F200；
N20 G91 X100.0；
N25 G02 Y100.0 R100.0；
N30 G03 X-100.0 I-50.0 J-50.0；
N35 G01 Y-100.0；
N40 G69 G90 X-50.0 Y-50.0 M02；
```

2．局部坐标系

格式：

G52 X_ Y_ Z_；　　　　建立局部坐标系（图 3-45）

X、Y、Z 是局部坐标系原点的工件坐标系中的坐标值，相当于把工件坐标系原点平移到了局部坐标系原点，尽管 G52 是非模态 G 代码，但它是存储器、非运动性指令，一旦生效之后，运动指令后的移动位置就是该局部坐标。

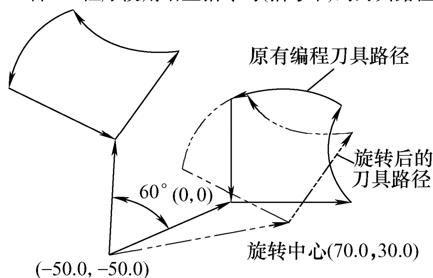


图 3-44　坐标系旋转

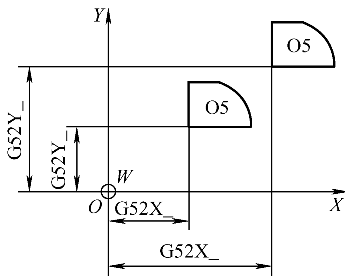


图 3-45　局部坐标系示意图

3.9　单件综合编程

例 1：斜拉桥桥鞍连接孔的数控加工

图 3-47 所示为斜拉桥桥鞍，它由鞍头、中跨和边跨三部分鞍座组成，各部分通过 86 个 ϕ40mm×100mm 的通孔用高强度螺栓联接起来，形成一个整体桥鞍，零件上 86 个 ϕ40mm×100mm

的通孔彼此的位置要求较高，为了减小应力对大桥的影响，连接表面及各孔要求表面粗糙度值为 *Ra*3.2μm，试编写连接孔的数控加工程序。

1. 工艺分析

根据题意，鞍座连接孔的加工难度主要有两点，一是各孔的位置精度，二是表面粗糙度要求。现制订如下工艺方案：用 *A*3 中心钻钻各孔至*ϕ*20mm，然后扩钻至*ϕ*38mm，最后精镗。所用刀具及切削用量见表 3-13。

表 3-13　刀具及切削用量　（单位：mm）

刀　具　号	刀 具 名 称	刀具长度补偿	切削速度/（m/min）	进给量/（mm/r）
T01	*A*3 中心钻	H01	20	0.1
T02	*ϕ*20mm 麻花钻	H03	20	0.18
T03	*ϕ*38mm 扩孔钻	H04	30	0.3
T04	*ϕ*40H7mm 镗刀	H06	60	0.15

2. 编程方法

经过 4 个工步，才能完成 86 个孔的加工，每个工步的加工程序，除了所用的刀具及加工的深度不一样外，其他都是一样的，即可以将共同的部分编成子程序调用。从图 3-46 中可以看出，各孔坐标是按极坐标方式标注的，故用极坐标编程要方便些，同时 86 个孔是呈对称分布的，又可以使用镜像功能，这样可以简化编程。鞍座加工现场如图 3-47 所示。

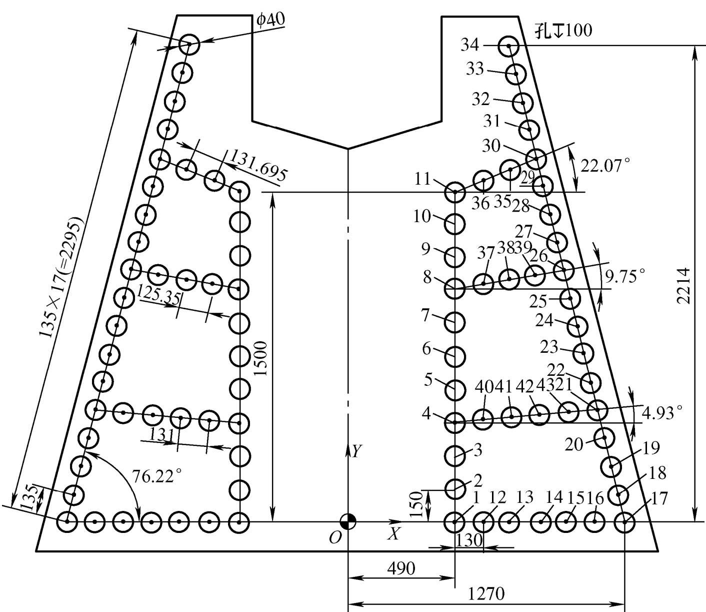


图 3-46　斜拉桥桥鞍



图 3-47　鞍座加工现场

3. 加工程序

加工子程序如下：

```
%O587;                                  加工子程序名
N05 G99;                                钻孔循环返回 R 参考点
N10 G00 G52 X490 Y0;                    G52 局部坐标设为极坐标原点，并到该点
N15 G00 G16 X150 Y90;                   G16 极坐标，X 为极半径，Y 为极角，到达孔 2
N20 X300 Y90;                           到达孔 3
N25 X450 Y90;                           到达孔 4
N30 X600 Y90;                           到达孔 5
N35 X750 Y90;                           到达孔 6
N40 X900 Y90;                           到达孔 7
N45 X1050 Y90;                          到达孔 8
N50 X1200 Y90;                          到达孔 9
N55 X1350 Y90;                          到达孔 10
N45 X1500 Y90;                          到达孔 11
N50 G00 G16 X620 Y0;                    到达孔 12
N55 X750 Y0;                            到达孔 13
N60 X880 Y0;                            到达孔 14
N65 X1010 Y0;                           到达孔 15
N70 X1140 Y0;                           到达孔 16
N75 X1270 Y0;                           到达孔 17
N80 G00 G52 X1270 Y0;                   G52 局部坐标，设为极坐标原点
N85 G00 G16 X135 Y103.78;               到达孔 18
N90 X270 Y103.78;                       到达孔 19
N95 X405 Y103.78;                       到达孔 20
N100 X540 Y103.78;                      到达孔 21
N105 X675 Y103.78;                      到达孔 22
N110 X810 Y103.78;                      到达孔 23
N115 X945 Y103.78;                      到达孔 24
N120 X1080 Y103.78;                     到达孔 25
N125 X1215 Y103.78;                     到达孔 26
N130 X1350 Y103.78;                     到达孔 27
N135 X1485 Y103.78;                     到达孔 28
N140 X1620 Y103.78;                     到达孔 29
N145 X1755 Y103.78;                     到达孔 30
N150 X1890 Y103.78;                     到达孔 31
N155 X2025 Y103.78;                     到达孔 32
N160 X2160 Y103.78;                     到达孔 33
N165 X2295 Y103.78;                     到达孔 34
N170 G00 G52 X490 Y1500;                G52 局部坐标，设为极坐标原点
N175 G00 G16 X131.695 Y27.07;           到达孔 36
N180 X263.39 Y27.07;                    到达孔 35
N185 G00 G52 X1050 Y490;                G52 局部坐标，设为极坐标原点
N190 G00 G16 X125.35 Y9.75;             到达孔 37
N195 X250.7 Y9.75;                      到达孔 38
N200 X376.05 Y9.75;                     到达孔 39
N205 G00 G52 X450 Y490;                 G52 局部坐标，设为极坐标原点
N215 G00 G16 X131 Y4.93;                到达孔 40
N220 X262 Y4.93;                        到达孔 41
N225 X393 Y4.93;                        到达孔 42
N230 G98 X524 Y4.93;                    到达孔 43，钻孔完返回起点
```

```
N235 M99;                               子程序结束
```

加工主程序如下：

```
%0207;                                  加工主程序名
N05 G40 G49 G54 G80 G90;
N10 G91 G28 Z0 T01;
N15 M06 T01;                            换中心钻
N20 G90 G00 X0 Y0 Z100;
N25 M03 S800 M08;
N30 G43 X0 Y0 Z5 H01 F80;               刀具长度补偿
N35 M98 G82 P0587 Z-7 R5 P300;          调用子程序 0587 钻中心孔，孔底延时 0.3s
N40 G00 Z100;                           抬刀
N45 G90 G00 X0 Y0;
N50 G51.1 X0;                           关于 Y 轴的镜像
N55 M98 G82 P0587 Z-7 R5 P300;          调用子程序 0587 钻中心孔，孔底延时 0.3s
N60 G00 Z100 M09;                       抬刀
N65 G90 G00 X0 Y0;
N70 G91 G28 Z0;
N75 M06 T02;                            换φ20mm 麻花钻
N85 G90 G00 X0 Y0 Z200 T03;
N90 M03 S1350 F70;
N95 G43 X0 Y0 Z10 H02 M08;              刀具长度补偿
N100 G83 P0587 Z-105 R5 Q20;            钻φ40mm 孔到φ20mm
N105 G00 Z100;                          抬刀
N115 G51.1 X0;                          关于 Y 轴的镜像
N120 G83 P0587 Z-105 R5 Q20;            钻φ40mm 孔到φ20mm
N125 G00 Z100 M09;                      抬刀
N130 G90 G00 X0 Y0;
N135 G91 G28 Z0;
N140 M06 T03;                           换φ38mm 扩孔钻
N145 G90 G00 X0 Y0 Z200;
N150 M03 S900 F100;
N155 G43 X0 Y0 Z10 H02 M08;             刀具长度补偿
N160 G81 P0587 Z-105 R5;                钻φ40mm 孔到φ38mm
N165 G00 Z100;                          抬刀
N170 G51.1 X0;                          关于 Y 轴的镜像
N175 G81 P0587 Z-105 R5;                钻φ40mm 孔到φ38mm
N175 G00 Z100 M09;                      抬刀
N180 G90 G00 X0 Y0;
N185 G91 G28 Z0;
N190 M06 T04;                           换φ40mm 微调精镗刀
N195 G90 G00 X0 Y0 Z200;
N200 M03 S1150 F80;
N205 G43 X0 Y0 Z10 H02 M08;             刀具长度补偿
N210 G81 P0587 Z-105 R5;                镗φ40mm 孔到尺寸
N215 G00 Z100;                          抬刀
N220 G51.1 X0;                          关于 Y 轴的镜像
N225 G81 P0587 Z-105 R5;                镗φ40mm 孔到尺寸
N230 G00 Z100 M09;                      抬刀
N235 G90 G00 X0 Y0;
N240 M30;
```

例 2：辊端接头的加工

辊端接头如图 3-48 所示，该零件是大型压力设备的主传动轴上的轴端接头，承受较大的转矩和冲击载荷，属于产品的重要零件。要求制订完整的加工工艺，并按图编写加工 8°大“X”形斜面、8×M36×2 的螺栓孔数控程序。

1．零件加工的工艺分析

（1）确定生产类型　该零件所属产品为重型机械设备，年产量少，不超过 30 件，所以属于单件小批生产的类型。

（2）零件的毛坯方面　采用合金材料 42CrMo 制作锻件毛坯，调质硬度要求达到 256～295HBW，以达到较强的力学性能。这就使机械加工工艺变得复杂，在毛坯粗加工后必须进行超声波探伤，没有问题才进行调质处理。为了检查调质处理后零件的内部质量，在半精加工后，再进行一次超声波探伤，合格后才转入下道工序。由于调质硬度高，对切削刀具的性能要求高，所以在购买或设计专用刀具时，要选择好的刀具材料。

（3）零件的技术精度分析　对零件的尺寸和精度的正确性与合理性进行审查，提出修改或合理化建议。

零件图中的重要加工表面有装配定位面ϕ695H7、内孔配合面ϕ450H7、键槽配合面 100H7，最高配合精度为 H7，几何精度最小为 0.025mm，对于ϕ720mm、长 690mm 的零件，如果在普通机床上加工，其精度要求偏高。例如，键槽配合面 100H7 的尺寸公差和几何公差都很小，只有在数控机床上加工才能够达到。

个别精度要求过高的，应该向设计者提出修改建议。例如，图中$\phi 695\text{H7}_{0}^{+0.08}$mm 的配合精度要求偏高。因为该配合的目的是使键槽 100H7mm 和 8×M36×2 的螺栓能够达到装配要求。但是ϕ695H7mm 较小公差反而会影响键槽 100H7mm 的配合，又因为螺栓与螺栓孔之间有一定的间隙，对它们的装配影响有限，故将ϕ695H7 改为ϕ695H8，以降低该尺寸的加工难度。

（4）零件加工的工艺性　在零件的工艺性方面，R35mm 和 8°的斜面是难加工的，既要保证曲面的准确性，又要保证两个曲面与键槽中心的对称性，只有在数控铣床、镗床上用程序加工才能实现，而且要准备专用刀具和用以检查对称性的样板。

在内孔中，R20mm 的退刀槽加工工艺性不太好，因为在ϕ450H7 孔底有ϕ200mm×8mm 的台阶，给加工 R20mm 的退刀槽造成困难，建议设计者去掉台阶，使加工 R20mm 的退刀槽较为方便。如果不能修改，必须采取工艺措施。

2．加工方案的制订

根据上述对零件的毛坯、热处理要求、加工精度和工艺性的分析，制订零件的整体加工方案和重要工序的加工方案。

（1）制订零件的整体加工方案　整体加工方案制订为：粗车（粗车内、外圆及总长）—探伤—调质—半精车—探伤（检查调质中有无缺陷）—精车（内、外圆及总长）—划扁方加工线—数控加工—钻孔—钳工。

（2）制订完整的加工工艺　以“辊端接头”为例，提供一份完整的机械加工工艺卡（表 3-14）、数控加工工艺及程序卡（表 3-15），供读者学习借鉴。

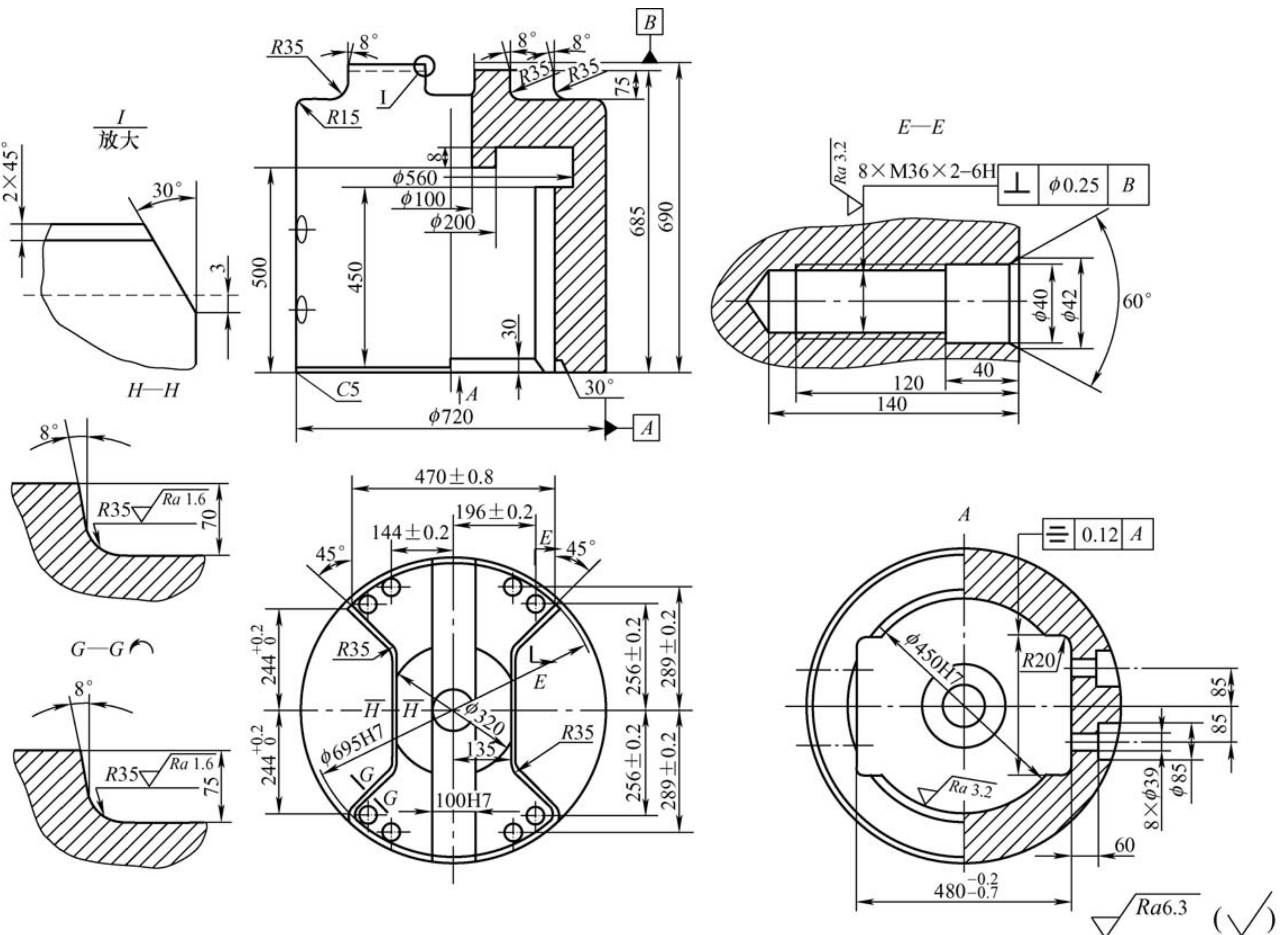

I
放大
2×45°
30°
3
H—H
R35
8°
R15
I
8°
8°
R35
R35
B
75
8
φ560
φ100
φ200
500
450
30
685
690
C5
A
30°
φ720
A
E—E
Ra 3.2
8×M36×2−6H
⊥ φ0.25 B
φ40
φ42
60°
40
120
140
8°
R35
Ra 1.6
70
G—G
8°
R35
Ra 1.6
75
470±0.8
144±0.2
196±0.2
45°
E
45°
R35
E
$244^{+0.2}_{\ 0}$
H
H
φ320
φ695H7
135
R35
256±0.2
289±0.2
G
G
100H7
A
≡ 0.12 A
φ450H7
R20
85
85
Ra 3.2
8×φ39
φ85
60
$480^{-0.2}_{-0.7}$
Ra6.3
(√)
图 3-48　辊端接头

表 3-14　机械加工工艺卡

零件名称	辊端接头	××公司（厂） 机械加工工艺（控制）卡				编号	第	1	页
图样代号	00006284						共	4	页
生产车间	订货代号	生产编号	数量	借用	日期	检验员	日期		
毛坯种类	材质	单件质量/kg	材料定额	编制		审查			
锻	34CrNiMo	3095							
备注	首件检验								
序号	工序名称	加工组	机床	单件工时	操作者	质检	定额员	工装号	
01	划	044900							
检查毛坯，余量应均匀，按粗加工图，（该图由工艺人员提供，本书略）划总长两端面线、两端十字中心线									
02	立车	040154	C523						
按线找正，两次装夹，车外圆及两端面见平、见光，表面粗糙度均达 *Ra*3.2μm									
03	探伤	04							
按图样要求进行超声波探伤（执行标准为 EZB/N31-2002），合格后转下道工序									
04	划	044900							
划两端十字中心线									
05	镗	040264	T615K						
按粗加工图要求预钻ϕ320 孔至ϕ70mm，并扩大到ϕ100mm。按划线找正工件外圆的母线和孔中心线，粗镗 *A* 向视图中的ϕ450H7 孔至ϕ430mm，铣孔端面见平。铣可调中心支承的 4 个爪位，工作台转 180° 后，钻、镗ϕ100mm 孔至ϕ70mm									
06	车	040122	H2-003						
两次装夹，车至符合粗加工图要求									
标记	处数	文件编号	更改人	更改时间	标记	处数	文件编号	更改人	更改时间

（续）

<table>
<tr><td rowspan="2">××公司（厂）
机械加工工艺（控制）卡（续）</td><td>编号</td><td>第</td><td>2</td><td>页</td></tr>
<tr><td></td><td>共</td><td>4</td><td>页</td></tr>
</table>

生产编号	订货代号	图样代号	零件名称
		00006284	辊端接头

<table>
<tr><td>序号</td><td>工序名称</td><td>加工组</td><td>机床</td><td>单件工时</td><td>操作者</td><td>质检</td><td>定额员</td><td>工装号</td></tr>
<tr><td>07</td><td>热处理</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="8">调质，合格后转下道工序</td><td></td></tr>
<tr><td>08</td><td>立车</td><td>040154</td><td>C523</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="8">两次装夹，车至见平、见光，外圆、内孔及两端面的表面粗糙度均达 Ra3.2μm，加工量尽量少</td><td></td></tr>
<tr><td>09</td><td>探伤</td><td>04</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="8">按图样要求进行第二次超声波探伤（执行标准为 EZB/N31-2012），合格后转下道工序</td><td></td></tr>
<tr><td>10</td><td>划</td><td>044900</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="8">以外圆为基准，划工件十字线，划ϕ100mm 孔加工线</td><td></td></tr>
<tr><td>11</td><td>镗</td><td>040264</td><td>T615K</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="8">工件左端对主轴，按线找正，钻、扩、ϕ100mm，钻通，至符合图样要求</td><td></td></tr>
<tr><td>12</td><td>立车</td><td>040154</td><td>C523</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="8">一、基准面 B 向下，垫平，按线找正、压紧
1．粗精车分开，车ϕ720mm 外圆至符合图样要求，车ϕ560 环形槽，按ϕ540mm 加工，车ϕ450mm 退刀槽，车ϕ200×500mm 凸台面，各倒角、半径均符合图样要求</td><td></td></tr>
</table>

标记	处数	文件编号	更改人	更改时间	标记	处数	文件编号	更改人	更改时间

（续）

<table>
<tr><td colspan="6" rowspan="2">××公司（厂）
机械加工工艺（控制）卡（续）</td><td>编号</td><td>第</td><td>3</td><td>页</td></tr>
<tr><td></td><td>共</td><td>4</td><td>页</td></tr>
<tr><td colspan="2">生 产 编 号</td><td colspan="3">订 货 代 号</td><td colspan="2">图 样 代 号</td><td colspan="3">零 件 名 称</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="3"></td><td colspan="2">00006284</td><td colspan="3">辊端接头</td></tr>
<tr><td>序号</td><td>工序名称</td><td>加工组</td><td>机床</td><td>单件工时</td><td>操作者</td><td>质检</td><td colspan="2">定额员</td><td>工装号</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="9">2．车ϕ685 端面及 30×30°倒角至符合图样要求
二、工件翻面，基面 B 向上，垫平，按ϕ720mm 外圆打表找正，误差不大于 0.03mm，压紧粗精车分开，车ϕ685mm 左面（台面）、ϕ690mm 左面以及各倒角、圆角至符合图样要求</td><td></td></tr>
<tr><td>13</td><td>划</td><td>014900</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="9">1．划“X”形的轮廓加工线，划 100H7 通槽加工线
2．划（196±0.2）mm 沉台加工线
3．划 8×M36×2−6H 及ϕ40mm 孔的加工线
4．划 A 向图中 $480_{-0.7}^{-0.2}$ mm×320mm（图中未标出）矩形及 R20mm 圆角的加工线</td><td></td></tr>
<tr><td>14</td><td>数控镗</td><td>040023</td><td>RAPID5</td><td></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="9">1．铣 8°斜面及 R35mm（X 形轮廓）各面，铣 196+196 沉台各面，铣 100H7 通槽各面，
各倒角、半径均符合图样要求
2．定 8×M36×2−6H 与ϕ40mm 孔的中心
3．粗镗 A 向图中的ϕ450H7 两处圆弧面，均单边留余量 2mm</td><td>8°、R35mm
球头铣刀</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="9">详见数控工艺</td><td></td></tr>
<tr><td>标记</td><td>处数</td><td>文件编号</td><td>更改人</td><td>更改时间</td><td>标记</td><td>处数</td><td>文件编号</td><td>更改人</td><td>更改时间</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

（续）

××公司（厂） 机械加工工艺（控制）卡（续）	编号	第	4	页
		共	4	页

生产编号	订货代号	图样代号	零件名称
		00006284	辊端接头

序号	工序名称	加工组	机床	单件工时	操作者	质检	定额员	工装号
15	插	040741	B5100					
基准面 B 向下，垫至等高，按ϕ720mm 外圆打表找正，误差应不大于 0.03mm，压紧。粗、精插 *A* 向图中 $480_{-0.7}^{-0.2}$ mm×320mm（图中未标出）矩形及 R20mm 圆角至符合零件图样纸要求								
16	划	044900						
划ϕ10mm、G1/2、ϕ30mm、ϕ39mm、ϕ85mm 孔加工线								
17	钻	040251	Z310					
钻、攻 8×M36×2−6H 螺纹，钻ϕ40mm 孔至符合图样要求								M56X3-6H 丝锥
18	镗	040264	T615K					
两次装夹，按已加工表面打表找正，钻、镗ϕ39mm 与ϕ85mm 孔至符合图样要求								
19	钳	044910						
对 *R*35mm、*R*20mm 表面进行抛光								
20	探伤	04						
对 *R*35mm、*R*20mm 圆角处进行磁探（EZB/N31—2002），对 *R*8mm 圆角处进行渗透探伤（GB/T18851.2—2005），合格后转下道工序或交检								

标记	处数	文件编号	更改人	更改时间	标记	处数	文件编号	更改人	更改时间

注：C61125——ϕ1250mm 卧式车床，T615K——ϕ150mm 卧式数控镗床，B5100——1m 插床，RAPID5C——ϕ160mm 卧式数控镗铣床。

表 3-15　数控加工工艺及程序卡

×××××公司（厂） 数控加工工艺（控制）卡				编制		第	1 页
				审核		共	1 页
零件图号	零件名称	机床型号	材料	质量/kg	工艺卡号	工序号	工装号
08630	辊端接头	TK60NC	42CrMo	1590		12	
工步	工 序 内 容						
1	在机床主轴一侧的工作台上，安装两个 V 形块，找正 V 形块的一个侧面，误差小于 0.05						V 形块
2	将有 100H7 键槽的一端面向机床主轴，以 ϕ720mm 外圆定位在 V 形块中，并用百分表在工件端面沿上、下和左、右检查端面圆跳动，公差为 0.02～0.025mm，然后夹紧工件						
3	粗、精加工 100H7 键槽符合图样要求						
4	用程序加工						
5	用平面铣刀分别精铣 $a_2b_2c_2d_2e_2f_2g_2h_2$ 和 $a_4b_4c_4d_4e_4f_4g_4h_4$ 的端面，深 75mm						
6	用成形铣刀分别粗、精加工 R35mm 曲面 $a_1b_1c_1d_1e_1f_1g_1h_1$ 和 $a_3b_3b_3c_3d_3e_3f_3h_3$						铣刀号
7	钻、扩、镗 E—E 图中 8×M36×2−6H 的底孔及倒角						样板号
8	攻 M36×2−6H 螺纹						丝锥号

3．重要工序的加工方案制订

“X”形斜面、100H7 键槽与 8×M36×2 螺纹等是零件重要的工序，需要制订具体的加工方案，具体见数控加工工艺（控制）卡。

8°大“X”形斜面的加工坐标零点设为 G54，各坐标点如图 3-49 所示，各坐标点的坐标值见表 3-16。

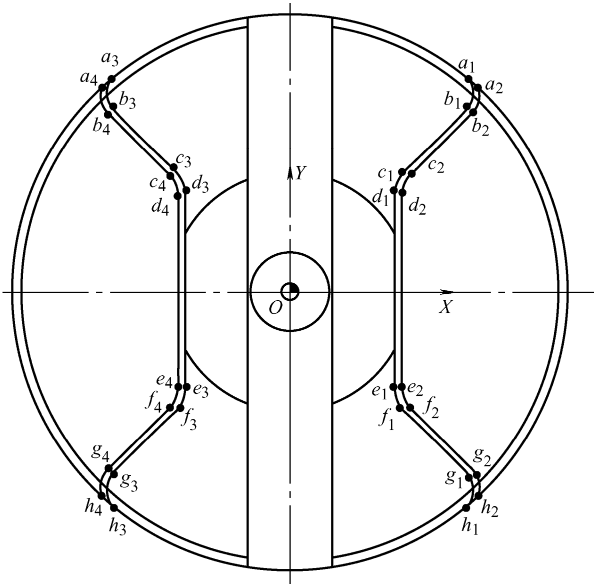


图 3-49　辊端接头的大“X”形斜面各坐标点

表 3-16　辊端接头的大“X”形斜面各坐标点的坐标值

刀位点	X 坐标	Y 坐标	刀位点	X 坐标	Y 坐标
a_1	225.672	280.486	a_2	239.607	268.680
b_1	230.607	239.427	b_2	235.343	235.879
c_1	144.0	154.751	c_2	154.251	150.523
d_1	135.0	129.503	d_2	145.251	125.775
e_1	135.0	−129.503	e_2	145.251	−125.775
f_1	144.0	−154.751	f_2	154.251	−150.523
g_1	230.607	−239.427	g_2	235.343	−235.879
h_1	225.672	−280.486	h_2	239.607	−268.680
a_3	−225.672	280.486	a_4	−239.607	268.680
b_3	−230.607	239.427	b_4	−235.343	235.879
c_3	−144.0	154.751	c_4	−154.251	150.523
d_3	−135.0	129.503	d_4	−145.251	125.775
e_3	−135.0	−129.503	e_4	−145.251	−125.775
f_3	−144.0	−154.751	f_4	−154.251	−150.523
g_3	−230.607	−239.427	g_4	−235.343	−235.879
h_3	−225.672	−280.486	h_4	−239.607	−268.680

8°大“X”形斜面的加工分两步：

第一步：

$a_2b_2c_2d_2e_2f_2g_2h_2$ 和 $a_4b_4c_4d_4e_4f_4g_4h_4$ 是直台阶，可用立铣刀加工出来。

第二步：

$a_1b_1c_1d_1e_1f_1g_1h_1$ 和 $a_3b_3b_3c_3d_3e_3f_3h_3$ 是 8°的斜台阶，要用成形刀加工，因此加工 8°大“X”形斜面，先划线，确定加工轮廓，在坐标普通镗床上，按坐标点连线 $a_2b_2c_2d_2e_2f_2g_2h_2$ 和 $a_4b_4c_4d_4e_4f_4g_4h_4$ 划线，成一个大写的“X”形，按先粗后精的原则，用立铣刀先粗加工 R35mm 的曲面，然后在数控镗床上用程序进行精加工。如果 R35mm 的曲面在数控机床上连续进行粗、精加工，就会引起较大的误差和变形。

1）R35mm 的表面粗糙度值为 Ra1、6μm 的曲面必须在数控镗床上用程序加工，为了保证曲面形状准确，设计成形铣刀，如图 3-50a 所示。在加工 R35mm 曲面之前，先在 T68 镗床上用端面铣刀按所划的曲面线和 75mm 深度进行粗加工，各留精加工留余量 2mm。

2）为保证左、右两个 R35mm 曲面相对于 100H7 键槽的对称性，必须设计 R35mm 曲面的检验样板，如图 3-50b 所示。

3）为保证 8×M36×2−6H 螺孔的位置精度，必须在数控镗床上用程序钻螺纹底孔和攻螺纹，要设计 M36×2−6H 的粗、精加工丝锥。

4）由于这些表面之间的相互位置精度要求高，最好是一次装夹能够全部加工，为此要设计 90°专用 V 形块，作为定位夹具，如图 3-50c 所示。

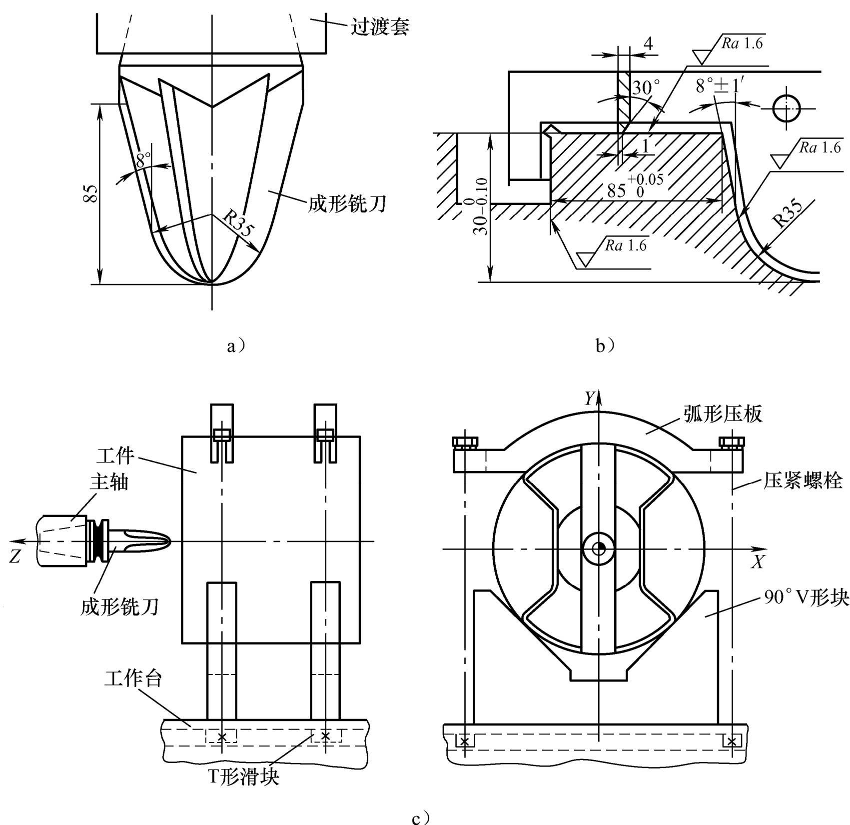


图 3-50　辊端接头的工装及装夹

a）R35mm 成形铣刀　b）R35mm 曲面检验样板　c）工件装夹

4. 成形铣刀的设计

为了保证大“X”形 8° 锥形体的加工，根据锥形体轮廓几何形状特点，设计了专用成形铣刀，在 SolidWorks 软件的三维设计环境中，模拟工件和刀具在实际加工时的相互位置关系，利用其三维造型功能，完成成形铣刀三维实体设计及前面内的投影视图，从而精确设计出铣刀廓形。铣刀刀头为倒回转圆锥台状，刀头上均布着 4～6 条切削刃，相邻切削刃刃口对刀杆中心线的径向圆跳动不大于 0.01mm，可以保证大“X”形 8° 锥形体的形状和尺寸精度及较高的生产率。

5. 编制程序

（1）“X”形直台阶的编程　选用立铣刀，分别用子程序“%O511”与主程序“%O207”加工直台阶，子程序只编写“$a_2b_2c_2d_2e_2f_2g_2h_2$”的“X”形一侧直台阶，“$a_4b_4c_4d_4e_4f_4g_4h_4$”的“X”形另一侧直台阶采用 G51.1 镜像指令（或用 G24），以简化程序。

程序如下：

%O511；	“X”形直台阶加工子程序
N10 G00 X370 Y0；	安全起点位置
N20 G01 G43 H01 Z−87.；	Z 向进深 12mm+75mm
N30 G42 X239.61 Y−268.68 D01；	圆弧半径插补到 h_2 点右侧
N35 G03 X235.343 Y−235.879 R15；	铣圆弧 R15mm 到 g_2 点

```
N40 G01 X154.251 Y−150.523；          铣削斜线到f2点
N45 G02 X145.251 Y−125.775 R35；      铣圆弧R35mm到e2点
N50 G01 X145.251 Y125.775；           铣削直线到d2点
N55 G02 X154.251 Y150.523 R35；       铣圆弧R35mm到c2点
N60 G01 X235.343 Y235.879；           铣削斜线到b2点
N65 G03 X239.607 Y268.680 R15；       铣圆弧R15mm到a2点
N70 G01 X240 Y270；                   刀具离开a2点
N75 Z20 M05；                         抬刀
N80 G00 X370 Y0；                     回到安全起点位置
N85 M99

%O207；                               "X"形直台阶加工主程序
N05 G00 G90 G54 X0 Y0 Z50.0；         主轴回到起点
N10 M06 T01；                         自动换刀，T01立铣刀
N15 M03 S800；                        主轴正转，转速为800r/min，
N20 X260 Y−370；                      刀具到工件h2点的外侧
N25 G01 G43 Z10. H01 F100；           进行刀具长度补偿
N30 M98 P511；                        调用子程序
N35 G51.1 X0；                        G51.1镜像指令（或用G24）
N40 M98 P511；                        调用子程序
N45 G00 X0 Y0 Z50.0；                 主轴回到起点
N50 M30
```

（2）R35mm 曲面的编程　分别用粗、精加工成形铣刀加工 $a_1b_1c_1d_1e_1f_1g_1h_1$ 和 $a_3b_3c_3d_3e_3f_3h_3$ 的 8°斜台阶曲面。粗、精加工程序一样，只是刀补值不一样，切削用量不一样。程序如下：

```
%O201；                               "X"形8°斜面的粗加工主程序
N05 G00 G90 G54 X0 Y0 Z50；           主轴回到起点
N10 M06 T01；                         自动换刀，T02成形铣刀
N15 M03 S800；                        主轴正转，转速为800r/min
N20 G00 X370 Y0；                     安全起点位置
N25 G01 G43 H01 Z−87. F100；          Z向进深12mm+75mm
N30 G42 X225.672 Y−280.486 D02；      圆弧半径插补到h1点右侧
N35 G03 X230.607 Y−239.427 R15；      铣圆弧R15mm到g1点
N40 G01 X144.0 Y−154.5；              铣削斜线到f1点
N45 G02 X145.251 Y−125.775 R35；      铣圆弧R35mm到e1点
N50 G01 X135.0 Y129.503；             铣削直线到d1点
N55 G02 X144.0Y154.751 R35；          铣圆弧R35mm到c1点
N60 G01 X230.607 Y239.427；           铣削斜线到b1点
N65 G03 X225.672 Y280.486 R15；       铣圆弧及R15mm到a1点
N70 G01 X224 Y285；                   刀具离开a1点
N75 G00 Y385；
N80 X−220；
N85 G01 X−225.672 Y260.486；          插补到a3点
N90 G03 X−230.607 Y239.427 R15；      铣圆弧及R15mm到b3点
N95 G01 X−144.0 Y154.751；            铣削斜线到c3点
N100 G02 X−135.0 Y129.503 R35；       铣圆弧R35mm到d3点
N105 G01 X−135.0 Y−129.503；          铣削直线到e3点
N110 G02 X−144.0 Y−154.751 R35；      铣圆弧R35mm到f3点
N115 G01 X−230.607 Y−239.427；        铣削斜线到g3点
```

N120 G03 X−225.672 Y−280.486 R15；	铣圆弧 R15mm 到 h_3 点
N125 G01 X−224 Y−285；	刀具离开 h_3 点
N130 G00 Z150；	刀具离开端面到安全位置
N135 G40 X0 Y0 M05；	取消刀具半径补偿
N140 M30；	取消刀具长度补偿，回换刀位置

（3）8×M36×2−6H 螺纹孔加工方案　先用中心钻 A3 定孔的中心，然后用ϕ34mm 的钻头钻螺纹小径，用镗刀加工至ϕ40mm，用 90°的角铣刀倒角，最后用 M36×2−6H 丝锥攻螺纹。

（4）8×M36×2−6H 螺纹孔加工程序　程序如下：

%O280；	
N05 G00 G90 G53 Z0.0；	主轴回机床零点，准备换刀
N10 M06 T04；	自动换刀，T04 中心钻 A3
N15 M03 S800；	主轴正转，转速为 600r/min
N20 G54 G43 Z3 H04 F50；	刀具离工件端面 3mm
N25 G81 G98 X196 Y256 Z-18 R-10；	G81 固定循环钻孔
N30 X144 Y289；	
N35 X-144 Y289；	
N40 X-196 Y256；	
N45 X-196 Y-256；	
N50 X-144 Y-289；	
N55 X144 Y-289；	
N60 X196 Y-256；	
N65 G00 G80 G49 Z50 M05；	取消固定循环和刀补，主轴停
N70 G53 Z0.0；	主轴回机床零点，准备换刀
N75 M06 T5；	自动换刀，T05 钻头ϕ34mm
N80 M03 S500；	主轴正转，转速为 500r/min
N85 G54 G43 Z3 H05 F50；	刀具离工件端面 3mm
N90 G83 G98 X196 Y256 Z−162.21 R−10 Q15；	G83 固定钻孔循环
N95 X144 Y289；	
N100 X−144 Y289；	
N105 X−196 Y256；	
N110 X−196 Y−256；	
N115 X−144 Y−289；	
N120 X144 Y−289；	
N125 X196 Y−256；	
N130 G00 G80 G49 Z50 M05；	取消固定循环和刀补，主轴停
N135 G53 Z0.0；	主轴回机床零点，准备换刀
N140 M06 T6；	自动换刀，T06 镗刀ϕ40mm
N145 M03 S500；	主轴正转，转速为 500r/min
N150 G54 G43 Z3 H06 F50；	刀具离工件端面 3mm
N155 G85 G98 X196 Y256 Z-40 R-10；	G85 固定镗孔循环
N160 X144 Y289；	
N165 X-144 Y289；	
N170 X-196 Y256；	
N175 X-196 Y-256；	
N180 X144 Y-289；	
N185 X144 Y-289；	
N190 X196 Y-256；	
N195 G00 G80 G49 Z50 M05；	取消固定循环和刀补，主轴停转
N200 G53 Z20.0；	主轴回机床零点，准备换刀

```
N205 M06 T7；                                    自动换刀，T07 角度铣刀
N210 M03 S500；                                  主轴正转，转速为 500r/min
N215 G54 G43 Z3 H07 F5；                         刀具离工件端面 3mm
N220 G85 G98 X196 Y256 Z–2.5 R–100；             G85 固定镗孔循环
N225 X144 Y289；
N230 X–144 Y289；
N235 X–196 Y256；
N240 X–196 Y–256；
N245 X–144 Y–289；
N250 X144 Y–289；
N255 X196 Y–256；
N260 G00 G80 G49 Z50 M05；                       取消固定循环和刀补，主轴停
N265 G53 Z0.0；                                  主轴回机床零点，准备换刀
N270 M06 T8；                                    自动换刀，M36×2 专用攻螺纹夹头
N275 M03；                                       主轴正转，转速为 500r/min
N280 G54 G43 Z3 H08 F2；                         刀具离工件端面 3mm
N285 G84 G98 X196 Y256 Z–120 R–45 P2000；        G84 固定攻螺纹循环
N290 X144 Y289；
N295 X–144 Y289；
N300 X–196 Y256；
N305 X–196 Y–256；
N310 X–144 Y–289；
N315 X144 Y–289；
N320 X196 Y–256；
N325 G00 G80 G49 Z50 M05；                       取消固定循环和刀补，主轴停
N330 M30；                                       程序结束
```

以上过程从所用工艺装备、工艺参数计算到数控程序设计等方面进行了全面的研究，并设计了成形铣刀，在加工 *R*35mm 曲面之前，先安排在 T68 镗床上用成形铣刀按曲面线粗加工，再用 *R*35mm 曲面检验样板保证左、右两个 *R*35mm 曲面相对于 100H7 键槽的对称性，最后采用程序加工大“X”形 8° 锥形体，这种工艺方案证明是最合理的，效率提高了一倍以上，取得了显著效果，该项成果对同类产品的制造有一定的参考实用价值。图 3-51 所示为现场加工后的辊端接头实物图。



图 3-51　现场加工后的辊端接头实物图

点　评

本节的两个例题有相当大的难度，这是中国重大技术装备制造业基地具有一定代表性的、结合工厂生产实际的选题，解决了单件零件生产过程中的工艺分析、工艺装备设计与选用及数控编程等一系列综合难题，可为高端读者提供参考。

第 4 章　R 参数编程与宏程序及其应用

4.1　参数与变量编程

相关知识点

参数编程也称自由编程（Free Programming），是手工编程中一项重要的编程技术。参数编程通过使用变量对程序指令进行算术和逻辑运算及条件转移的编程功能，编写普通方法无法编出来的一些复杂曲线（面）或同类零件的加工程序。

在参数编程中，不同的编程系统使用不同的变量。日本法拉克（FANUC）数控编程系统的参数编程是使用#号及其后的数字作为变量（Variable），用它编写的参数程序称为宏程序（Macro-Programming），它类似于子程序；德国西门子（SINUMERIK）数控编程系统的参数编程是使用参数 R（Parameter）及其后的数字作为变量，用它编写的程序称为 R 参数子程序。

利用参数编程可以编写一个程序，通过修改变量，就可以加工形状相同而尺寸不同的同类、相似或相关的许多零件；通过改变相应参数，就能适应产品形状及尺寸的变化，实现快速、方便编写出各种零件的程序，并能二次开发和提高数控系统的使用性能，实现柔性制造。

R 参数编程与宏程序及其应用作为本书的提高部分，体现出高级编程的方法、技巧与效率，也是本书的最核心内容。

1. 西门子 R 参数的分类

用户自定义参数：参数的名称和类型均由用户定义，并可将数值分配给它们。

（1）算术参数　特殊的预先定义的运算参数，如其地址 R 之后的数字。预先定义的运算参数是 REAL 型，参数的类型见表 4-1。

表 4-1　参数的类型

类　型	名　称	说　明
INT	整型	定义计数器、整数等
REAL	实型	含有小数点的数
BOOL	布尔	逻辑判断 0 为假（FALSE），1 为真（TRUE）
CHAR	字符型	如以代码 0～255 规定的 ASCⅡ字符
STRING	字符串型	用[ ]表示字符中包含的个数，最大 200 个字符
AXIS	轴型	仅用于轴名（轴地址）
FRAME	FRAME 型	用于平移、转动、比例、镜像几何参数

（2）系统参数　系统在所有现有程序中可用且可以处理的参数，如零点偏置、刀具补偿、实际位置值、轴的实测值、控制状态等。

2. R 参数运算规则

R 参数运算规则类似于数学运算，与“C 言语”相同。参数的算术运算符及函数运算见

表 4-2。

表 4-2　参数的算术运算符及函数运算

+	加	SIN()	正弦	ASIN()	反正弦	POT()	平方
–	减	COS()	余弦	ACOS()	反余弦	TRUNC()	舍位整数
*	乘	TAN()	正切	ATAN()	反正切	ROUND()	进位整数
/	除	实数除法，如：3/4=0.75					
EXP()	指数	SQRT()	平方根	ABS()	绝对值	LN()	自然对数
DIV	取整（整除），对整型和实型有效，如 3DIV4=0						

3. R 参数运算示例

示例程序如下：

N05 R01=R01+1；	R01+1 赋值给 R01，一般用作计数器
N10 R01=R02+R03 R04=R04–R6；	参数加、减运算
N15 R07=R8*R09 R10=R11 / R12；	参数乘、除运算
N20 R14=R1+R2/R3；	混合运动，先乘除运算，后加减运算
N25 R13=SIN(75)+40*COS(67)；	三角函数运算
N30 R16=SQRT(R14*R14+R15*R15)；	求平方根
N35 G01 G91 X=R01 Z=–R02；	给坐标赋值

4. 程序跳转

无条件程序跳跃编程，可以改变程序的正常执行顺序，其操作规则是：从当前的位置跳跃到程序标号所指定的位置。无条件程序跳跃必须是独立的一个程序段，用标号说明程序运行地址。格式为：

GOTOB LABEL；　　　　或 GOTOF LABEL；

其中：

GOTOB—向后跳跃目的的“跳跃指令”（向程序开头）。

GOTOF—向后跳跃目的的“跳跃指令”（向程序结尾）。

LABEL—程序标号，字母开头，冒号结尾，不超过 8 个字符。

有条件程序跳跃编程：当满足一定的条件时，就从当前的位置跳跃到程序标号所指定的位置，格式为：

LABEL:；	语句标号
IF 条件表达式 GOTOB LABEL；	条件循环判断

条件表达式的运算符有：

=：等于；＜＞：不等于；＞：大于；＜：小于；＞=：大于或等于；＜=：小于或等于。

跳跃条件可以利用 IF 指令公式化，如果跳跃条件满足，就可以执行跳跃到编程跳跃目的点。操作程序是：跳跃条件可以利用任何对比或逻辑操作来编程（结果：TRUE 或 FALSE）。如果操作结果是 TRUE，那么程序跳跃就可以执行；若干有条件跳跃可以在同一个程序段内公式化。

跳跃条件示例：

IF R1>R2 GOTOF MARKE1；	如果 R1＞R2，那么跳跃到 MARKE1
IF R7<= (R8+R9) *743 GOTOB MARKE1；	作为条件的复合表达式
IF R10 GOTOF MARK1；	

先要定义一个变量（INT、REAL、BOOL 或 CHAR）的类型，如果该变量值为 0，则条件为假（FALSE），只要变量值不为 0，则条件为真（TRUE）。

IF R1=0 GOTOF MARKE1 IF R1=1；　　　　同一程序中的几个条件 GOTOF MARKE2

5. 程序段重复（REPEAT/REPEATB）

需要重复的程序段利用标号识别，其编程格式主要有以下四种：

（1）单段重复　程序举例：

```
…
N10 LOOP1：R6=R6−1 LF
…
N40 …
N50 REPEAT LOOP1 P=4 LF              执行 N10～N40 之间程序段 4 次
N60 …
```

（2）区间重复　程序举例：

```
N10 LOOP1：R5=R5+20 LF
N20 …
N30 LOOP2：X=R5*SIN（38）LF
N40 …
N50 REPEAT LOOP1 LOOP2 P=5 LF        执行 N10～N30 之间程序段 5 次
```

（3）标号至 REPEAT 间的重复　程序举例：

```
LABEL：aaa
bbb
…
REPEAT LABEL P=n
ccc
```

（4）标号与结束标号间的重复　程序举例：

```
LABEL：aaa
bbb
ENDLABEL：ccc
…
REAPEAT LABEL P=n
ddd
```

综合程序示例：

```
N10 LOOP1：R8=R8 −1 LF
N20 …
N30 LOOP2：X=R5+10 LF
N40 …
N50 ENDLABEL：G00 Z100 LF
N60 …
N70 LOOP3：X50 LF
N80 …
N90 REPEAT LOOP3 P=2 LF              执行 N70～N90 之间程序段 2 次
N100 REPEAT LOOP2 P=4 LF             执行 N30～N50 之间程序段 4 次
N110 REPEAT LOOP1 P=3 LF             执行 N10～N50 之间程序段 3 次
N120 …
```

例 1：简单平面件的 R 参数编程

加工图 4-1 所示的工件，工件厚度为 10mm。

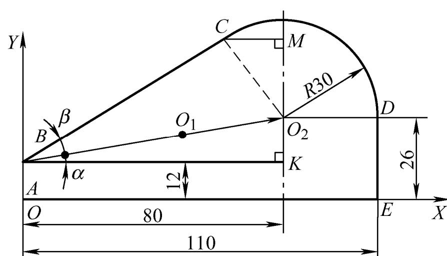


图 4-1　简单平面件 R 参数编程

1．数设定与坐标计算

设 R01=α，R02=β，R03= $\overline{BO_2}$

α 角及斜边计算：在直角 $\triangle BKO_2$ 中：R01= ATAN[（26−12）/80]，ATAN 为反正切函数；R03=SQRT（POT（26−12）+POT（80）），SQRT 为平方根函数；

β 角计算：在直角$\triangle BCO_2$ 中，R02=ASIN（30/R03），ASIN 为反正弦函数。

2．程序编制

程序如下：

```
RCANSHU.MPF；                              主程序名
N05 G90 G17 S400 Z10 M03；                 选择工作平面，主轴起动
N10 G00 X0 Y−50；                          到达起始位置
N15 G01 Z−10 F150；                        下刀，深度 Z=−10mm
N20 G41 D01 X0 Y0；                        切入工件完成刀具半径补偿，刀补号 D01
N25 Y12；                                  走到 B 点
N30 R01=ATAN((26−12)/80)；                 数控系统自动计算所需坐标
N35 R03=SQRT(POT(14)+POT(80))；            表达式或函数要符合 SINUMERIK 格式要求
N40 R02=ASIN(30/R03)；
N42 R05=26+30*COS(R01+R02)；               坐标点计算结果可以先赋值给一个变量 R05
N45 G01 X=80−30*SIN(R01+R02) Y=R05；       走到 C 点，计算并直接赋值给 X
N50 G02 X110 Y26 CR=30；                   走到 D 点
N55 G01 Y0；                               走到 E 点
N60 X0；                                   走到 A 点
N65 G00 D00 X−10 Y−20 M05；                退刀，D00 取消刀具补偿
N70 M30；
```

点　评

传统编程时，都是先计算坐标点，如图 4-1 中的 C 点坐标，通常采用手工或计算机计算，程序中对应的是具体坐标值，本例充分利用几何或函数关系，由数控系统自动计算所需坐标，效率很高，当图形发生变化时，通过修改参数就能重新计算出新的坐标。

例 2：直角坐标方式编写 R 参数加工程序

加工图 4-2 所示的工件，工件厚度为 15mm，用直角坐标方式编写 R 参数加工程序。

1．参数设定与坐标计算

设 R01 = $\angle fOm$，R02 = $\angle kOe$，因为直角$\triangle fmO$ 与直角$\triangle feO$ 全等，则 $\angle fOm = \angle fOe$，所

以 $\angle kOe = 90 - 2\angle fOm$，即 $\mathrm{R02} = 90° - 2 \times \mathrm{R01}$，在直角△$fmO$ 中：$\mathrm{R01} = \angle fOm = \arctan(20/40)$

R02=90° −2×R01=90−2×26.5651=36.87°

e 点的坐标值：$x = -40\sin 36.87° = -24$，$y = 40\cos 36.87° = 32$

图 4-2　直角坐标方式 R 参数编程

2．程序编制

程序如下：

```
YUANQEI.MPF;                                    主程序名
N05 G90 G54 G00 S400 Z10 M03;                   选择工作平面，主轴起动
N10 X−65 Y−20;                                  到达起始位置
N15 G01 Z−10 F150;                              下刀，深度 Z=−10mm
N20 G41 D01 X−40 Y−20;                          切入工件 g 点，完成半径补偿，刀补号 D01
N25 X20;                                        走到 b 点
N30 G03 X40 Y0 CR=20;                           加工 R20mm 圆弧，走到 c 点
N35 G03 X0 Y40 CR=40;                           加工 R20mm 圆弧，走到 d 点
N40 R01=ATAN(20/40);
N45 R03=SQRT(20*20+40*40);
N50 R02=ACOS(40/R03);
N55 G03 X=−40*COS(R01+R02) Y=40*SIN(R01+R02) CR=40;
                                                走到 e 点
N60 G01 X−40 Y20;                               走到 f 点
N65 Y−40;                                       走向 g 点，并退刀
N70 G00 D00 Y−65 M05;                           退刀，D00 取消刀补
N75 Z50;                                        抬刀
N80 M30;                                        程序结束
```

N55 一行走刀到 e 点，其坐标是由人工计算的，相对比较麻烦，若由下面三行代替，也可达到同样的目的，其坐标计算由数控机床自动完成，提高了编程效率。

```
N40 R01=ATAN（20/40）;
N45 R02=90−2*R01;
N55 G03 X=−40*SIN(R02) Y=40*COS（R02）CR=40;        走到 e 点
```

点 评

从上面两例中可以看出，基点或节点的计算可以手工进行，也可由数控机床自动完成。一般教材通常举的例子都是采用第一种方式即手工或 CAD 把所有坐标值全部算出来，程序中用的是具体坐标编程，这种方法具有直观的特点，但遇到工件图形相似或相近时，原来的程序几乎不能再使用，修改起来也很麻烦，也就是说，采用第一种方式编写的程序通用性极差，这对多品种生产类型很不适应。采用第二种方式即 R 参数计算坐标由数控机床自动完成的参数编程具有显著的优势，通过 4.2 节的各个例子，读者会更加感受到这一优势。

例 3：极坐标方式编写 R 参数加工程序

加工图 4-3 所示的工件，工件厚度为 15mm，极坐标方式编写 R 参数加工程序。

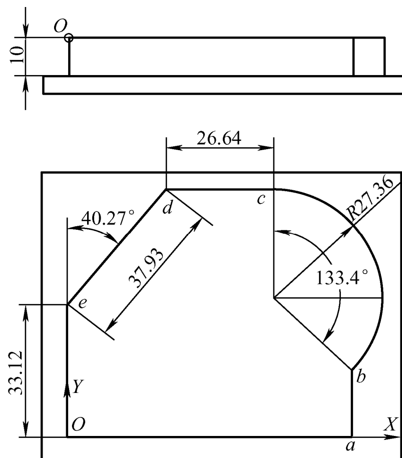


图 4-3　极坐标方式 R 参数编程

程序如下：

```
JIZUOBIAO.MPF;
N05 G90 G54 G00 X-30 Y-30;              到达起始点，工件之外的安全位置
N10 M03 S600 F80;
N15 G01 Z-10;                           下刀，深度 Z=-10mm
N20 G41 D01 X0 Y0;                      切入工件 O 点，完成刀具半径补偿
N22 Y33.12;
N25 G111 X0 Y33.12;                     设定极心
N30 G01 AP= (90-40.27) RP=37.93;        采用表达式编程
N35 G01 X=IC(26.64);                    采用 IC 增量方式编程
N37 G110 Y=IC(-27.36);
N40 G02 AP=-43.4 RP=27.36;
N45 G01 Y0;
N50 X-10;
N55 G00 G41 D00 X-30 Y-30;              D00 取消刀补，回到起刀点
N60 M30
```

点　评

通过上述三例可以看到，零件坐标点可以是一个具体的坐标值，也可以是带变量的表达式。在例 1、例 2 中，应用表达式求出各点的直角坐标，再编写程序；在例 3 中，应用表达式求出各点的极角坐标。用哪种坐标方式完全取决于图样尺寸的标注形式与计算的方便程度。

4.2　SINUMERIK 840D 参数编程

相关知识点

SINUMERIK 数控系统是目前比较先进的一种，现广泛应用于大中型数控机床上，很多工厂都在使用这一数控系统，其中的一个很重要的特点就是它可以通过改变某些 R 参数的赋值，实现同类零件共用一个程序，从而极大地提高编程效率；同时只要通过改变 R 参数，就能够实现产品形状及尺寸的变化，从而实现柔性制造。如本例，只要操作者输入任意一个确定的值，就可以加工出不同大小的五角星，由此可以看到 R 参数编程的效果，更奇妙的效果在以后的例子中将会看到。

例 1：直线平面轮廓 R 参数编程

加工图 4-4 所示的五角星，轮廓相交处按铣刀半径考虑，五角星外接圆半径 $\overline{OP_1}$=100，深度为 10mm，Z 轴零点设在工件表面，底部留有 30mm 的夹头，在立铣床上用机用虎钳装夹，试编写程序。

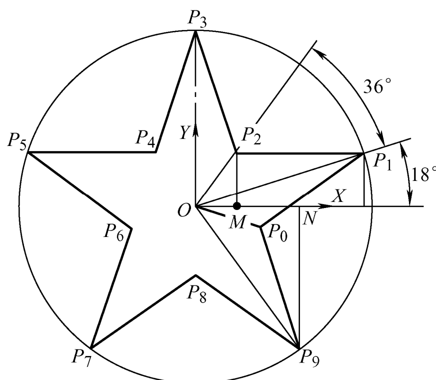


图 4-4　直线平面轮廓 R 参数编程

1．参数设定与坐标计算

设五角星外接圆半径参数为 R10，五角星有五个大顶点和五个小顶点，每个顶点的夹角为 72°，由于对称关系，只需要计算出四个点的坐标，即 P_0、P_1、P_2、P_9，设 R01、R02 分别代表 P_1 点的 X、Y 坐标，R03 代表 P_2 点的 X 坐标，则有

R01＝R10∗COS（18）

R02＝R10∗SIN（18）

根据直角△OMP_2有

$$R03 = R02 / \tan 54°$$

设R04代表P_2点半径，则有

$$R04 = \sqrt{R02^2 + R03^2}$$

设R05、R06分别代表P_0点的X、Y坐标，则有

R05＝R04*COS（－18）

R06＝R04*SIN（－18）

设R07、R08分别代表P_9点的X、Y坐标，则有

R07＝R10*COS（－54）

R08＝R10*SIN（－54）

2. 程序编制

程序如下：

WUJIAOXING.MPF;	主程序名
N05 G90 G17 S400 Z10 M03;	程序初始化
N10 R10=100;	外接圆半径五角星的大小由其外接圆半径确定，由操作者输入，即任意大小五角星的通用程序
N15 G00 X=1.3*R10 Y0;	到达起始位置
N20 G01 Z−10 F150;	下刀至Z=−10
N25 R01=R10*COS（18）;	计算P_1点的X坐标值
N30 R02=R10*SIN（18）;	计算P_1点的Y坐标值
N35 R03=R02/TAN（54）;	计算P_2点X坐标
N40 R04=SQRT（R02*R02+R03*R03）;	计算OP_2的长度
N45 R05=R04*COS*（−18）;	计算P_0点X坐标
N50 R06=R04*SIN（−18）;	计算P_0点Y坐标
N55 R07=R10*COS（−54）;	计算P_9点X坐标
N60 R08=R10*SIN（−54）;	计算P_9点Y坐标
N65 G42 D02 G01 X=R01 Y=R02;	走到P_1点，D02刀具半径存储号
N70 G01 X=R03 Y=R02;	走到P_2点
N75 X0 Y= R10;	走到P_3点
N80 X=−R03 Y=R02;	走到P_4点，坐标与P_2点对称
N85 X=−R01 Y=R02;	走到P_5点，坐标与P_1点对称
N90 X=−R05 Y=R06;	走到P_6点
N95 X=−R07 Y=R08;	走到P_7点
N100 X0 Y=−R04;	走到P_8点
N105 X=R07 Y=R08;	走到P_9点，坐标与P_7点对称
N110 X=R05 Y=R06;	走到P_0点，坐标与P_6点对称
N115 X=R01 Y=R02;	走到P_1点
N120 G00 D00 X=1.3*R10 Y0 M05;	退刀到起点并取消刀补
N125 M30;	程序结束

这是一个任意大小五角星（其一个顶点在Y轴上且关于Y轴对称）的通用程序，只要给定五角星外接圆半径，就可以加工出任意大小的五角星，不需要再编程。

通过本例可以看出，应用参数与变量编程的优点如下：

1）由于使用变量进行编程，程序能够用变量对零件的加工轮廓的编程坐标进行算术和逻辑运算，使编程坐标值的计算快速、准确。

2）在参数编程中，可用程序语句和 NC 语句进行条件转移和循环语句的编程，这就能将同样的加工轮廓编程大为缩短和简化。

3）有利于典型零件加工表面编程的标准化。在应用变量编程时，对于表面轮廓相同而尺寸不同的零件，只需编写一个通用程序。当要加工该类零件时，将不同零件的尺寸输入到相应的变量中（西门子编程系统为修改参数的赋值），就能够实现程序加工。

4）简化工人的编程和操作，提高生产现场的编程效率。

本例是采用直角坐标系逐点计算各坐标点编写的五角星通用程序，要计算 10 个点的坐标，相对来说，还是比较麻烦的，读者在以后的例子中还可以看到更为简便的 R 参数五角星通用子程序。

随着产品升级换代及生产节奏的加快，同时减少重复劳动，人们将大量的、典型的加工表面通用程序编写出来并存储到数控机床中，当生产中遇到同类型轮廓的零件时，只需将相应尺寸输入到对应 R 参数中，即可立即生成所需程序。这就是 SINUMERIK 数控系统 R 参数编程。

点　评

SINUMERIK 840D 数控系统是目前比较先进的一种，现广泛应用于大中型数控机床上，很多工厂都在使用这一数控系统，其中的一个很重要的特点就是它可以通过改变某些 R 参数的赋值，实现同类零件共用一个程序，从而极大地提高编程效率；同时只要通过改变 R 参数，就能够实现产品形状及尺寸的变化，从而实现柔性制造。

例 2：内矩形槽 R 参数编程

在 *OXY* 平面，编写图 4-5 所示的内矩形槽铣削 R 参数子程序，并调用该子程序加工图 4-6 所示的零件。

1. R 参数的设定

R01——槽长，R02——槽宽，R03—— 刀具半径，R04——槽深，R05——槽内圆角半径。

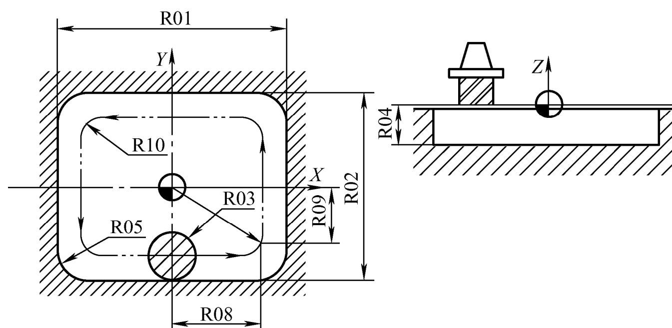


图 4-5　内矩形槽 R 参数设置

2. R 参数子程序

程序如下：

```
LEIJUXING.SPF；            内矩形槽参数子程序
N05 R06=2*R05；
N10 R10=R04–R03；          刀具中心轨迹编程，因此减去了一个刀具半径 R03
```

```
N15 R08=R01/2−R03；
N20 R09=R02/2−R05；
N25 R0l=R01−R06；
N30 R02=R02−R06；
N35 G91 G60 G01 Z=−R04；                 下刀
N40 G64 G01 X=R08 Y=−R09；               光滑切入工件
N45 Y=R02；
N50 G03 X=−R10 Y=−R10 CR=R10；
N55 G01=−R01；
N60 G03 X=−R10 Y=−R10 CR=R10；
N65 G01 Y=−R02；
N70 G03 X=R10 Y=−R10 CR=R10；
N75 G01 X=R01；
N80 G03 X=R10 Y=R10 CR=R10；
N85 G01 Z=R04；                          抬刀
N90 G00 X=−R08 Y=R09；
N95 G90 M17；
```

3. 主程序调用序

程序如下：

```
DIAOYONG.MPF；                              调用子程序（图 4-6）
N05 G90 G54 G00 X0 Y0 Z25；                 到达起始点，刀具在工件之外的安全位置
N10 M03 S600 F80；                          选取 φ18mm的键槽铣刀，便于垂直下刀
N15 R01=44 R02=44 R03=9 R05=12 R04=5；      给内矩形槽各 R 参数赋值
N20 LEIJUXING；                             调用内矩形槽铣削 R 参数子程序
N25 G00 Z25 M05
N30 M30
```

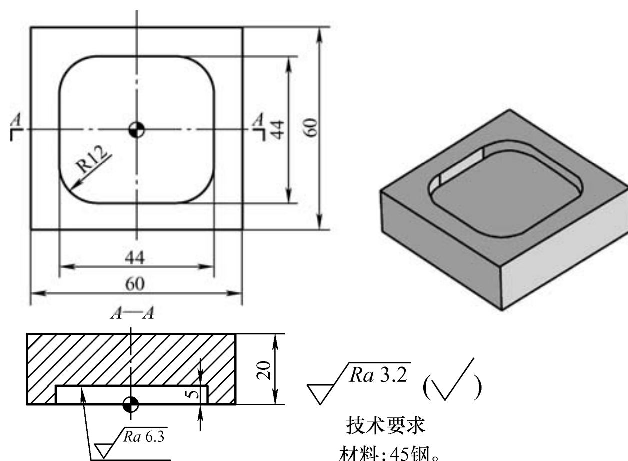


图 4-6　内矩形槽铣削加工

4. 几种变化情况分析

下面分六种情况对内矩形槽 R 参数子程序进行讨论，如图 4-7 所示。

1）当 R01>R02 时，是一个呈水平方向布置的长槽，如图 4-7a 所示。

2）当 R01<R02 时，是一个呈垂直方向布置的长槽，如图 4-7b 所示。

3）当 R01>R02=2R05 时，是一个呈水平方向布置的键槽，图中没画出。

4）当 R02>R01=2R05 时，是一个呈垂直方向布置的键槽，如图 4-7c 所示。

5）当 R01=R02 时，是一个正方形槽，如图 4-7d 所示。

6）当 R01=R02=2R05 时，是一个半径为 R05 的圆，如图 4-7e 所示。

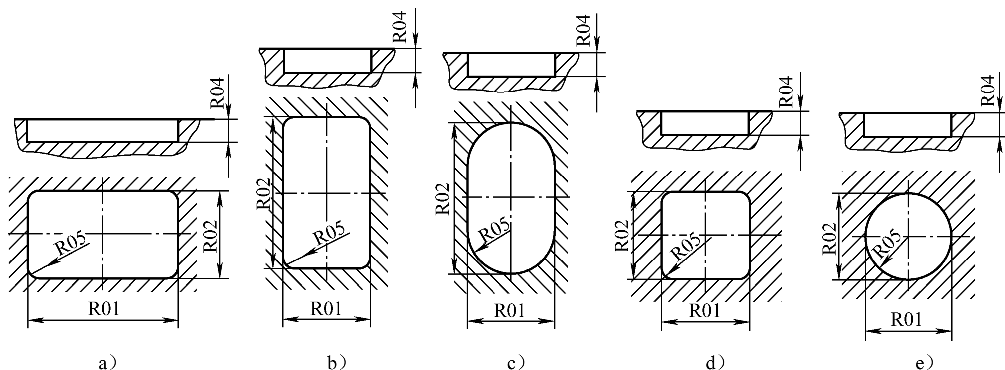


图 4-7　内矩形槽的几种变化情况

这六种情况均可用一个程序 LEIJUXING.SPF 完成加工。

内矩形槽这样的几何图形，原本是一个“死板”的矩形，以前在编写零件程序的过程中，总是把它看成固定不变的零件的一部分，一个零件图形对应一个甚至多个程序，零件图形稍为有点变化，又要重新编程，程序重复利用率很低。由本例可以看出，通过改变 R01、R02、R05 等相关参数以及它们之间的关系，就可以将原本“死板”的矩形图形衍生出六种几何图形，而使用的程序还是原先的那个子程序。

再结合 SINUMERIK 系统的平移、旋转、比例缩放、镜像等架构功能，这个“死板”的矩形还能衍生出更多的几何图形，这样的图形就“活”了，通过原先那个内矩形槽 R 参数子程序就可以解决所衍生出的众多几何图形的加工，正如任意大小正五角星参数程序一样，程序重复利用率得到了极大的提高。

点　评

通过 R 参数子程序就可以解决所衍生出的众多相同或相似甚至不相似的几何图形的加工，程序重复利用率得到了极大的提高，这就是 SINUMERIK 系统 R 参数编程的优势所在，读者在本书中还可以从更多的例子中感受到。

例 3：外矩形凸台 R 参数编程

铣削图 4-8a 所示的两个形状相似、大小不同的矩形凸台的外轮廓。试编写 *OXY* 平面的通用 R 参数子程序，并应用主程序调用方式，加工两个矩形凸台的外轮廓。

1. 参数设定与坐标计算

矩形凸台外轮廓各参数设定如图 4-8b 所示，矩形凸台的长度为 R01，宽度为 R02，矩形凸台的圆角半径为 R05，刀具的 *Z* 向背吃刀量为 R04（绝对值），并假设零件上表面为 Z0，刀具半径（精确数据）为 R03，矩形凸台几何中心坐标为（R06，R07），其他 R 参数见图示，虚线表示刀具的中心轨迹，加工起点为 *S* 点。

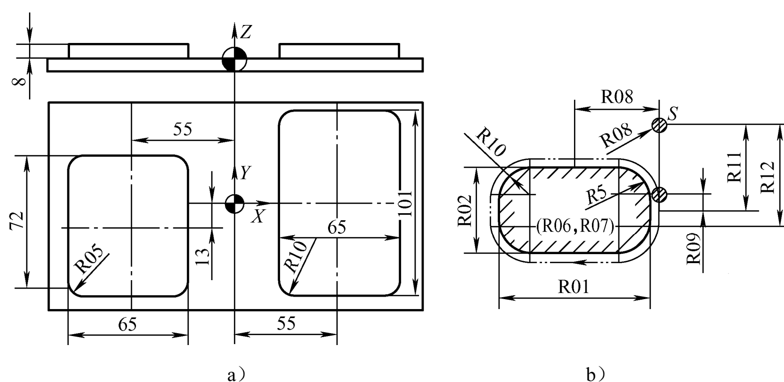


图 4-8　矩形凸台外轮廓

2. R 参数子程序

程序如下：

```
JUXINGTAI.SPF;                              矩形凸台 R 参数子程序
N05 R10=R03+R05;                            计算中心轨迹的圆角半径
N10 R08=R01/2+R03;                          计算矩形中心到起点 S 在 X 向的距离
N15 R09=R02/2−R05;
N20 R11=R02/2+2*R05;                        计算矩形中心到起点 S 在 Y 向的距离
N25 R12=R09+R11;                            计算第一次直线插补位移量
N30 R18=R06+R08 R19=R07+R11;                计算起点 S 的 X、Y 坐标
N35 R01=R01−2*R05 R2=R02−2*R5;              计算矩形水平方向、垂直方向的直线长度
N40 G00 X=R18 Y=R19;
N45 G01 Z=−R04 F100;
N50 G91 G01 Y=−R12;
N55 G02 X=−R10 Y=−R10 CR=R10;
N60 G01 X=−R01;
N65 G02 X=−R10 Y=R10 CR=R10;
N70 G01 Y=R02;
N75 G02 X=R10 Y=R10 CR=R10;
N80 G01 X=R01;
N85 G02 X=R10 Y=−R10 CR=R10;
N90 G90 G00 Z=R04;
N95 M17;
```

3. R 参数子程序主调用

程序如下：

```
JUXING1.MPF;                                加工矩形凸台外轮廓主程序
N05 G54 G00 G90 Z20;
N10 T02 D02;                                选用φ32mm 立铣刀
N15 X0 Y0 S800 M03;
N40 G00 Z15;
N50 R01=101 R02=65 R03=16 R04=0 R05=10 R06=55 R07=0;
                                            赋初值
N60 JUXINGTF;                               加工大矩形凸台轮廓
N70 R01=72 R02=65 R03=16 R04=0 R05=5 R06=−55 R07=−13;
                                            赋初值
N80 JUXINGTAI;                              加工小矩形凸台轮廓
N90 G00 X0 Y0;
```

```
N100 G00 Z30;
N110 M30;
```

4. 几种变化情况分析

与内矩形槽一样，下面分六种情况对外矩形凸台进行讨论。

1）当 R01>R02 时，是一个呈水平方向布置的矩形凸台。

2）当 R01<R02 时，是一个呈垂直方向布置的矩形凸台。

3）当 R01>R02=2*R5 时，是一个呈水平方向布置的凸键。

4）当 R02>R01=2*R5 时，是一个呈垂直方向布置的凸键。

5）当 R01=R02 时，是一个方台。

6）当 R01=R02=2*R5 时，是一个半径为 *R*5mm 的圆台。

这六种情况均可用一个程序 JUXINGTAI.SPF 完成加工。

点　评

这个外矩形凸台 R 参数子程序与上例一样，原本也是一个“死板”的矩形凸台，同样可以通过改变 R01、R02、R05 等相关参数以及它们之间的关系，就把原本“死板”的矩形凸台衍生出六种几何图形，而使用的程序还是原先那个子程序。

这两例说明，掌握 SINUMERIK 系统 R 参数编程方法及架构功能是一个高级编程员所必备的。

4.3　程序跳转及程序段重复功能

例 1：任意正多边形的编程

铣削任意正多边形的外轮廓，试编写出通用的 R 参数子程序。

1. 图形设计

为了具有通用性，任意正多边形的边长要任意，边数要任意，正多边形中心位置要任意，且起始角度也要任意，加工用的刀具直径也要随任意正多边形的大小变化而变化，通过四个“任意”充分体现出正多边形的通用性！

任意正多边形的数控加工如图 4-9 所示。

2. 相关参数设定与尺寸计算

正多边形边长=R01，正多边形边数=R02，起始位置角度=R03，正多边形中心点坐标设为（R05，R06），R10 设为正多边形某一边对应的顶角，也是正多边形外接圆上的圆心角，根据上述已知条件可以计算出：R10=360/R02，正多边形中心点到各顶点的距离（即正多边形外接圆半径）R07=（R01/2）/SIN（R10/2）。

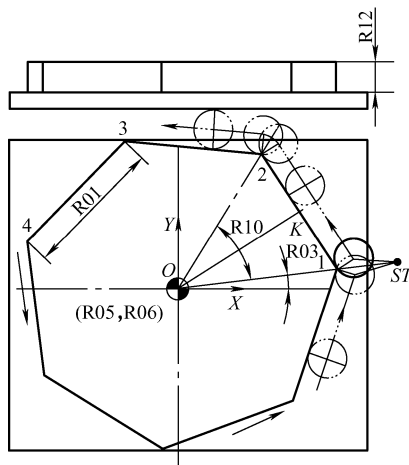


图 4-9　任意正多边形的数控加工

3. 刀具选择

加工用的刀具直径也要随任意正多边形的大小变化而变化，为此，将刀具大小与边长建立联系，根据实际

经验，取刀具半径为边长的1/10，且自动圆整并规定其最小半径与最大半径的范围，刀具半径R11=DIV（R01/10），起刀点*ST*的规定：从正多边形中心点开始加上边长再加上三倍刀具半径所确定的坐标点作为程序起点，加工结束后再回到*ST*点。

4. 坐标计算

坐标计算有很多方法，如直角坐标系、极坐标系等。本例若采用直角坐标系计算，会很不方便。正多边形一定有一个外接圆，且每边所对应的圆心角相等，若采用极坐标系计算，因为各点的极心不变，极半径不变，且极角又有规律可循，再利用循环指令编程，那就方便多了。本例采用极坐标系加循环指令编程的方法。

已知条件：正多边形边长=R01，正多边形边数=R02，起始位置角度=R03，正多边形中心点坐标为（R05，R06），刀具半径R11=ROUND（R01/10）；在直角△*KOI*中，正多边形外接圆半径R07=（R01/2）/SIN（180/R02）；*ST*点：极半径值=R01+3*R11，极角=R03；每边所对应的圆心角，R10=360/R02；第1顶点坐标：极半径值=R01，极角=R03；第2顶点坐标：极半径值=R01，极角=R03+R10。

以后每个顶点的极角增加一个R12，而极半径值不变，当累计增加的角度值等于360°时，正多边形加工结束，这就是循环的终止条件。

5. 程序编制

程序如下：

ZDBX.SPF；	任意正多边形参数子程序
N05 R07=R01/2）/SIN（180/R02）；	计算正多边形外接圆半径
N10 R11=ROUND（R01/10）；	计算刀具半径，并取半径ϕ5～ϕ157.5mm范围的标准刀具
N15 IF R11<2.5 THEN R11=2.5；	当计算值小于2.5时，取ϕ5mm的刀具
N20 IF R11>157.5 THEN R11=157.5；	当计算值大于157.5时，取ϕ315mm的刀具
N25 M06 T01 D01；	“智能化”选取刀具，刀具半径补偿值D01=R11
N30 R22=R01+3*R11；	*ST*点的极半径
N35 R10=360/R02；	每边所对应的圆心角
N40 G111 X=R05 Y=R06；	正多边形的极心位置
N45 G00 G90 RP=R22 AP=R03；	“智能化”走到起点*ST*
N50 G01 Z=−R12；	下刀
N55 R09=R03；	R09用于累计圆心角角度值，R03为起始角度
N60 KK：G42 RP=R01 AP=R03；	建立刀补并走到第1个顶点开始切削
N65 R09=R09+R10；	每加工一个顶点，累计一个圆心角角度值
N70 IF R09<360+R03 GOTOB KK；	圆心角净增值小于360°时，跳转到KK位置
N75 G01 G42 D00 RP=R22 AP=R03；	D00取消刀补，回到起点，加工完毕
N80 G00 G40 Z=IC（R12+10）；	用IC增量方式抬刀，其中10是安全距离
N85 RET（M17）；	参数子程序结束

本例中的任意正多边形编程思路高度体现了“智能化”的编程思想，具体表现为：

1）正多边形的边长任意，边数任意，且起始角度任意。

2）正多边形中心点坐标任意。

3）加工用的刀具大小直径大小随任意正多边形的大小变化而变化。

4）起刀点位置也随任意正多边形的大小变化而变化，“智能化”走到起点位置。

上述的几个“任意”不仅体现了任意正多边形R参数子程序的通用性，更体现了按正多边形大小选择刀具直径大小、确定刀具起点位置的智能化以及操作机床的方便性与安全性等。

点　评

数控机床朝着高性能、高精度、高速度、高柔性化和模块化方向发展，但最主要的发展趋势是智能化、开放化、网络化。其中的智能化发展趋势不外乎有两个方面：一是数控技术的开发者开发出更好的数控系统软件，二是数控技术的使用者利用数控系统软件编写出更好的数控加工程序。这里的数控技术使用者主要是编程人员，其编写的程序更能替机床操作者着想，减少操作步骤，做到人性化提示、方便与安全，就是真正的智能化体现。要让数控机床的操作者操作机床就像使用傻瓜相机一样的方便与简单，当然，还有很长的路要走。

例 2：内孔 R 参数子程序

铣削图 4-10a 所示的内孔工件。试编写 *OXY* 平面内的通用 R 参数子程序，并应用主程序调用方式加工三个孔（已铸出毛坯孔）。

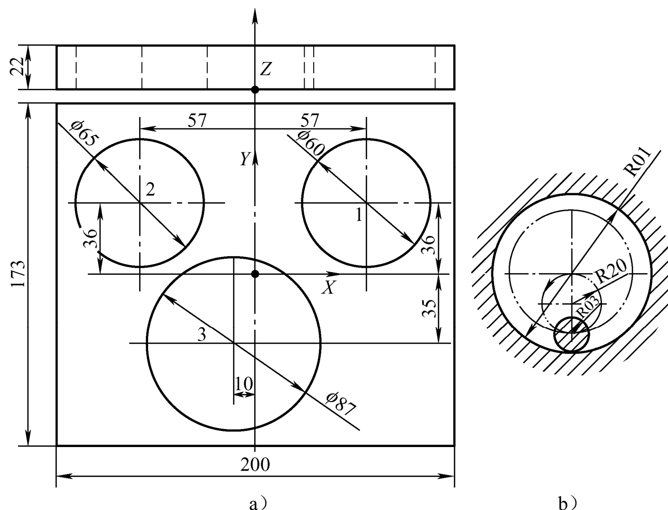


图 4-10　内孔工件的铣削

1. 参数设定与坐标计算

设内孔直径为 R01，即加工圆直径，刀具半径（精确数据）为 R03。

内孔铣削属于内轮廓加工，往往受到内孔空间的限制而无法建立刀补，为了让 R 参数子程序更加具有通用性，采用刀具中心轨迹编程，同时还考虑圆弧切入切出，以提高零件表面的光滑程度，因此刀具运动轨迹设计如图 4-10b 所示，刀具中心轨迹设计为“过渡圆切入工件——加工内孔——过渡圆切出工件”，其中过渡圆半径为 R02，根据加工圆直径、刀具半径（精确数据）计算出过渡圆半径 R02 的值，计算如下：

加工圆直径为 R01，则 R01/2 为加工圆半径，采用 SINUMERIK840D 格式，通过赋值的方式（实际上就是 C 语言格式），求得加工圆半径 R01=R01/2，由于是内轮廓加工，减去一个刀具半径 R03，即刀具中心轨迹圆半径，并继续赋值给 R01：R01=R01/2−R03（注意此时的 R01 不再是原先的加工圆直径 R01 了），过渡圆半径 R02 的值则为：R02=R01/2。

2. R 参数子程序

程序如下：

```
LEIKONG.SPF;                            内孔铣削 R 参数子程序名
N05 R01=R01/2−R03;                      刀具中心轨迹圆半径
N10 R02=R01/2;                          过渡圆半径
N15 G91 G64 G03 X=0 Y=−R01 CR=R02       过渡圆切入工件，G64 光滑过渡
N20 X0 Y0 I0 J=R01;                     走一个整圆，加工出内孔，只能用 IJ 方式编程
N25 X0 Y=R01 CR=R02;                    过渡圆切出工件，回到中心位置
N30 G90 M17;
```

3．R 参数子程序主调用

```
DIAOYONG.MPF;
N05 G90 G17 G54 Z20;                    程序初始化
N10 T01 D01;                            选φ50mm 的玉米铣刀，D01 为刀补号
N15 S400 M03 F200;                      主轴起动，给定切削用量
N20 G00 X57 Y36;                        到达第一个孔的起始位置
N25 G01 Z−23 F150;                      下刀，进给至 Z−23 处，通孔，多下 1mm
N30 LEIKONG R01=60 R03=25.5;            调用 R 参数子程序并赋给参数值
N35 G00 Z20;                            抬刀
N40 G00 X−57 Y36;                       到达第二个孔的起始位置
N45 G01 Z−23 F150;                      下刀，进给至 Z−23 处，通孔，多下 1mm
N40 LEIKONG R01=65 R03=25.5;            调用 R 参数子程序并赋给参数值
N50 G00 Z20;                            抬刀
N55 M06 T02 D02;                        换φ63mm 的玉米铣刀
N60 G00 X−10 Y−35;                      到达第三个孔的起始位置
N65 G01 Z−23 F150;                      下刀，进给至 Z−23 处，通孔，多下 1mm
N70 LEIKONG R01=87 R03=31.5;            调用 R 参数子程序并赋给参数值
N75 G00 Z20;                            抬刀
N80 M03;                                程序结束
```

点　评

内圆铣削是最常见的加工方式。通过本例可知，只要选择合适的内孔铣削刀具，就可直接调用内孔铣削 R 参数子程序，铣削任意内孔、沉孔、止口圆等部位，再结合螺旋线 TURN 方式，一边圆弧进给，一边下刀，加工过程连续进行，效率也很高。

例 3：利用双重循环加工多圈环形均布孔

编写图 4-11 环形分布的各孔加工程序，已知第一圈孔中心圆半径为 50mm，有四个均匀分的孔；第二圈孔中心圆半径为 90mm，有八个均匀分布的孔；以后每圈孔的中心圆半径均增加 40mm，均匀分布的孔数翻番，一共有 10 圈。所有的孔均为φ20mm 的通孔，孔深为 30mm。

1．题意分析

如果按照一般的编程思路，将每一个孔的坐标计算出来，再编写程序，其工作量是非常大的。十圈孔的总数为 $2^2+2^3+2^4+\cdots+2^{11}=\frac{4(1-2^{10})}{1-2}=4092$，要计算各孔的坐标、编写程序、向机床输入程序、调试，其工作之大是可想而知的。

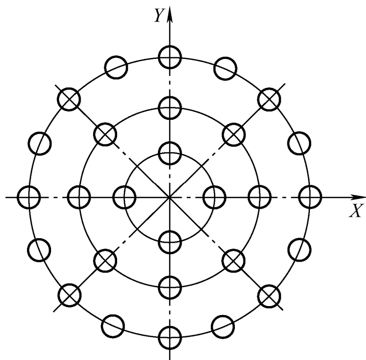


图 4-11　环形分布的各孔加工

显然从题目中可以找出许多规律来，这对我们编程十分有利。

2. 编程规律

由于已知各孔呈圆周均匀分布，用极坐标编程比较方便，且所有孔的极坐标的极心都不变。

第一圈第一个孔的位置：极角 AP=0，极半径 RP=25。

以后每个孔的极坐标只变极角，变化的规律：每次增加 R05=90，循环 R06=4 次。

第二圈第一个孔的位置：极角 AP=0，极半径 PR=RP+25。

以后每个孔的极坐标只变极角，变化的规律：每次增加 R05=R05/2，循环 R06=2*R06 次。

以加工的层数作为循环的终止条件，设定一个计数器 R07。

3. 编制程序

程序如下：

HUANXINK.MPF；	循环孔加工程序
N05 G54 G00 G90 X0 Y0；	
N10 S600 M03 F100；	
N15 R02=3 R03=30 R06=4 R07=0；	R07 计算圈数，R06=4 为第一圈的孔数
N20 R05=90 R20=0 R21=25 R08=10；	给参数赋值，R20 为极角，R21 为极半径初值，R08 为总圈数
N25 TT: G111 X0 Y0；	G111 为设定极心，TT 为循环标志，外层循环开始
N30 QUANB: G81 AP=R20 RP=R21；	钻孔参数，R02=3 是安全平面
N35 QUANE: R20=R20+R05；	QUANB 为内层循环开始，QUANE 为内层循环结束
N40 REPEAT QUANB QUANE R06；	程序段重复
N45 R07=R07+1；	计数器计算加工的圈数
N50 R21=R21+25；	计算下一圈的半径值
N55 R05=R05/2；	计算下一圈角度增量
N60 R20=0；	重新回到 0° 位置
N65 R06=2*R06；	计算下一圈的孔数
N70 IF R07<R08 GOTOB TT；	条件判断外层循环是否结束
N75 G80；	取消孔加工固定循环
N80 M30；	

点　评

本例采用了内外两层循环编程方式，从 N25 到 N70 为外层循环，采用 IF … GOTO 循环，用于控制总的加工圈数；从 N30 到 N40 为内层循环，采用 REPEAT 程序段重复循环，用于控制每圈各孔。由于是浅孔，采用了 G81 钻孔指令，若是不通孔或深孔，本程序只要把 G81 替换成 G82、G83 或 CYCLE82、CYCLE83，然后给定相应的参数即可，这样程序就可以完成钻、扩、镗等工作。

4.4　平面曲线轮廓加工

例 1：直线平面轮廓零件编程

加工一个带有五个五角星凸台的平面轮廓零件，各凸台高度为 10mm，试编写加工程序，有关要求如图 4-12 所示。

1．题意分析

工件上有五个五角星凸台，其大小、方向、位置均不相同，若一个一个地编写加工程序，不仅麻烦，而且工作效率也不高，若以后出现类似的几何图形还得再次编写，重复工作量大，若能用 R 参数编写一个一般性的五角星凸台的 R 参数子程序（称为“活”程序），调用该子程序并通过坐标变换及比例缩放等方法，就很容易完成本工件的程序编制。初始状态下的 R 参数子程序称为原始子程序。

2．五角星有关参数设定与计算

如图 4-13 所示，设五角星第一个顶点处于水平位置，五角星外接圆半径 $\overline{OP_1}$ 为 R01，在直角△KOP_1 中，$\overline{KO}$ = R01 SIN(18)，P_2 点的半径 $\overline{OP_2}$ 设为 R02，在直角△KOP_2 中，$\angle KP_2O = 54°$，则 R02 = $\overline{KO}$ / SIN（54）= R01 SIN（18）/ SIN（54）。

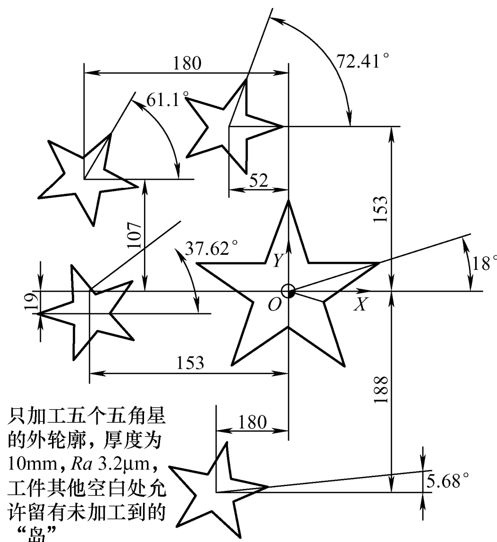


图 4-12　五角星凸台的平面轮廓零件

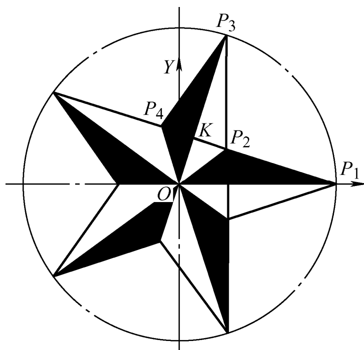


图 4-13　原始五角星

3．原始子程序

程序如下：

程序	说明
YUANWJXZ.SPF；	子程序
N05 R02=R01*SIN（18）/SIN(54)；	五角星的外接圆半径
N10 G01 G42 D02 X=R01+2*R02 Y0；	走到 *ST* 点，并完成的刀补
N10 G01 X=R01；	走到 P_1 点，开始加工
N15 KK：G111 X0 Y0；	五角星 REPEAT 循环开始
N20 RP=R02 AP=IC（36）；	走到 P_2 点，开始加工
N25 RP=R01 AP=IC（36）；	走到 P_3 点，加工出 1/5 的五角星
N30 REPEAT KK P=4；	程序段重复 4 次
N35 G40 X=R01 Y0；	
N40 RET；	

4．五角星凸台平面轮廓加工主程序

程序如下：

程序	说明
WGEWJX.MPF；	五角星凸台主程序
N05 G90 G54 G00 Z10；	到达起始点，工件之外的安全位置

N10 M03 S600 F180；	
N15 R01=50 R02=刀具半径；	大五角星，R01=50。为了保证程序的通用性，程序中未给出具体的刀具半径值
N20 ROT Z18；	旋转 18°
N25 G01 Z–10；	下刀，进给至 Z–10 处
N30 WJXZCX；	调入原始子程序，加工第一个五角星
N35 G00 Z10；	抬刀
N40 TRANS X–52 Y153；	坐标平移到（X–52，Y153）
N45 ROT Z0.41；	旋转 0.41°
N50 SCALE X0.7 Y0.7	比例缩放 0.7 倍，加工小五角星，R01=35
N55 G01 Z–10；	下刀，进给至 Z–10 处
N60 WJXZCX；	调入原始子程序，加工第二个五角星
N65 G00 Z10；	抬刀
N70 TRANS X–180 Y107；	坐标平移到（X–180，Y107）
N75 ROT Z61.1；	旋转 61.1°
N80 SCALE X0.7 Y0.7；	比例缩放 0.7 倍，加工小五角星，R01=35
N85 G01 Z–10；	下刀，进给至 Z–10 处
N90 WJXZCX；	调入原始子程序，加工第三个五角星
N100 G00 Z10；	抬刀
N105 TRANS X–153 Y–19；	坐标平移到（X–153，Y–19）
N110 ROT Z37.62；	旋转 37.62°
N115 SCALE X0.7 Y0.7；	比例缩放 0.7 倍，加工小五角星，R01=35
N120 G01 Z–10；	下刀，进给至 Z–10 处
N120 WJXZCX；	调入原始子程序，加工第四个五角星
N125 G00 Z10；	抬刀
N130 TRANS X–80 Y188；	坐标平移到（X–80，Y188）
N140 ROT Z5.68；	旋转 5.68°
N145 SCALE X0.7 Y0.7；	比例缩放 0.7 倍，加工小五角星，R01=35
N150 G01 Z–10；	下刀至 Z–10
N155 WJXZCX；	调入原始子程序，加工第五个五角星
N160 G00 Z50 M05；	抬刀
M165 M30；	

点　评

本例采用极坐标系编程，只需要计算五角星 1/5 的坐标点，再通过 REPEAT 程序段指令，重复 4 次编写的五角星通用 R 参数子程序。这个在初始状态（五角星其中一个顶点在 *X* 轴上）下编写的 R 参数子程序称为原始子程序，它与本章 4.2 节中的例 1 的五角星子程序相比要简单得多，应用所编程的五角星原始子程序，通过 SINUMERIK 系统的平移、旋转、比例缩放等功能编写一个主程序，实现了带有大小不同、角度不同、位置不同的五个五角星凸台的平面轮廓零件的程序编制，工作效率大大提高。

相关知识点

1．@循环功能编程

通过 SINUMERIK880、8MC、840C 的@循环功能，可以实现基本的算术运算、逻辑运算以及循环功能编程等。这些主要是通过@代码来实现的，“@”符号作为功能码地址符。通过循环功能编程可以解决复杂的编程问题和系统中的数据传递，用@代码可以手工编写较为

复杂的程序。@代码后面有2～3位数字，第一位数字定义主组，第二位数字定义子组，第三位数字确定特殊功能。

@0××——结构说明　　@1××——程序分支
@2××——数据传递　　@3××——数据传递
@4××——数据传递　　@5××——文件管理
@6××——运算功能　　@7××——专用功能

@码后面的附加信息及标记为NC专用功能，如@90为取坐标地址符，表明当前是哪一个坐标轴。为确认和区别各种具体功能，@码后面要附加信息，它是通过以下字母定义的：

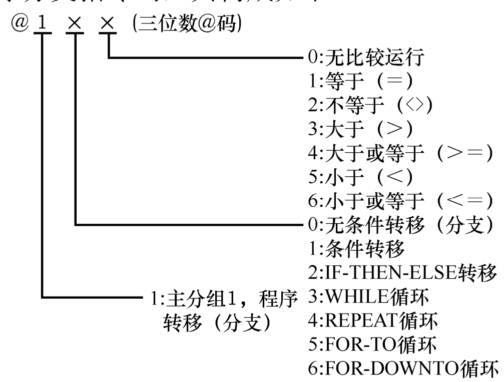
R变量参数：表示程序中的相关参数，其通式标记为<R–RAAR>。

P指针：指向某一参数。

K、P、R标记为<VAIUE>，由K指定的常数值，带“+”“–”号，“+”为向下搜索，“–”为向上搜索；在有的程序中规定不能修改，属于直接赋值，VAIUE表示数值。

2. 常用@码

（1）@1××码　程序分支指令码，其构成如下：



上述指令码举例如下：

1）@100——无条件转移，跟在@100后面为常数（CONST），指定为必须转移的目标。通式：

@100 <CONST>K；	K是常数
示例：	
@100 K375；	无条件转移至N375，向下搜索（程序结尾方向）
@100 K–150；	无条件转移至N150，向上搜索（程序开头方向）

2）@111——多分支条件转移，条件为“等于”。通式：

```
@111 <VAR> <VALUE1> <CONST1>;
           <VALUE2> <CONST2>;
           <VALUEN> <CONSTN>;
```

<VAR>表示变量，其值与<VALUE>进行比较，如果满足“等于”条件时，相应的<CONSTN>指定程序段转移，否则执行下一程序段。示例：

N475 @111 R11 K1 K480；	当变量R11等于常数1时，程序转移到 N480并执行N480
K2 K485；	当变量R11等于常数2时，程序转移到 N485并执行N485
K3 K490；	当变量R11等于常数3时，程序转移到 N490并执行N490
@100 K900；	否则（当R11均不等于1、2、3时），转移到N900并执行N900

N480 ×××××；	执行本语句
@100 K900；	程序无条件跳转到 N900
N485 ×××××；	执行本语句
@100 K900；	程序无条件跳转到 N900
N490 ×××××；	顺序执行
N900 ×××××；	顺序执行

3）@121～@126——如果（IF）条件满足那么（THEN）执行下一程序段指令，否则（ELSE）程序转移至<CONST>常数指定的程序段上一个@码。通式如下：

@121 <VAR> <VALUE> <CONST>　条件为：<VAR> = <VALUE>，“等于”。
@122 <VAR> <VALUE> <CONST>　条件为：<VAR> <> <VALUE>，“不等于”。
@123 <VAR> <VALUE> <CONST>　条件为：<VAR> >　<VALUE>，“大于”。
@124 <VAR> <VALUE> <CONST>　条件为：<VAR> >= <VALUE>，“大于等于”。
@125 <VAR> <VALUE> <CONST>　条件为：<VAR> < <VALUE>，“小于”。
@126 <VAR> <VALUE> <CONST>　条件为：<VAR> <= <VALUE>，“小于等于”。

各@12×码举例如下：

@121 R13 R27 K375；	当 R13≠R27 时程序转至 N375，否则继续向下执行
@122 R15 R28 K400；	当 R15=R28 时程序转至 N400，　否则继续向下执行
@123 R14 R26 K−150；	当 R14≤R26 时程序转至 N−150，否则继续向下执
@124 R16 R25 K−180；	当 R16<R25 时程序转至 N400，否则继续向下执行
@125 R18 R24 K−200；	当 R18≥R24 时程序转至 N−200，否则继续向下执行
@126 R19 R20 K50；	当 R19>R20 时程序转至 N50，否则继续向下执行

（2）@6××码，算术计算指令码　@6××构成如下：



@6××码算术计算功能：

1）@610 <Var> <Value>；	取<Value>数的绝对值存入<Var>地址中
示例（R12=−34）：	
@610 R76 R12；	将|R12|存入 R76（R76=34）中
2）@613 <Var> <Value>；	取<Value>数的平方根寄存在<Var>中
示例：	
@613 R76 K64；	将运算结果 $\sqrt{64}$ 存入 R13（R13=8）
3）@614 <Var> <Value1> < Value2>；	取<Value1>与<Value2>两数的平方和的平方根存入<Var>地址中
示例（R25=15，R26=20）：	
@614 R77 R25 R26；	将运算结果 $\sqrt{15^2+20^2}$ =25 存入 R77（R77=25）中
4）@620 <Var>；	取<Var>变量并增 1，寄存在<Var>中（递增计数器：用于正计数）
示例（R70=1）：	
@620 R70；	将运算结果 R70+1=2 存入 R70（R70=1）中，相当于一个正计数器，程序每循环一次，按增加方式计一次数
5）@621 <Var>；	取<Var>变量并减 1，寄存在<Var>中（递减计数器：用于倒计数）

示例（R60=1）：

@621 R70；　　将运算结果 R70−1=0 存入 R70（R70=0）中，相当于一个倒计数器，程序每循环一次，按增减方式计一次数

6）@622 <Var>；　　取整数，寄存在<Var>中（取整，小数点部分舍去）

示例（R60=2.9）：

@622 R60；　　运算结果（取整）R60=2（只取整数部分寄存，不是四舍五入）

7）@630 <Var> <Value>；　　求<Value>的正弦函数，其值存入<Var>中

示例（R27=30）：

@630 R15 R27；　　将 R27 中的 30 正弦值寄存在 R15（R15=0.5）中，相当于 R15=sin（R27），R27=30°，故 R15=0.5

8）@631 <Var> <Value>；　　求<Value>的余弦函数，其值存入<Var>中。

示例（R27=60）：

@631 R16 R27；　　将 R27 中的 60 正弦值寄存在 R16（R16=0.5）中，相当于 R16=cos（R27），R27=60°，故 R16=0.5

9）@632 <Var> <Value>；　　求<Value>的正切函数，其值存入<Var>中。

示例（R32=45）：

@632 R18 R32；　　将 R32 中的 45 正切值寄存在 R18（R18=1）中，相当于 R18=tan（R32），R32=45，故 R18=1

10）@634 <Var> <Value>；　　求<Value>的反正弦函数，其值存入<Var>中

示例（R35=0.70710678）：

@634 R17 R35 R35；　　数值的反正弦，其运算结果的角度记入 R17（R17=45）中，相当于 R17=arsin（R35），R35=0.70710678，故 R17=45°

11）@637 <Var> <Value1> <Value2>；　　求由<Value1>与<Value2>构成的坐标点的角度，其值存入<Var>中。<Value1>和 <Value2>两数中，若其中一个为常数，此时另一运算对象必须是变量（参数）或指针。两者只允许一个数为常数

示例（R35=−20，R36=30）：

@637 R17 R35 R36；　　由（−20，30）构成的坐标点，该点在第二象限，角度=180°−artan（3/2）= 146.31°，存入 R17 中

由（−20，30）构成的坐标点，该点在二象限，角度=180−ATAN（3/2）=146.31°，存入 R17 中

例 2：M56 以上大螺纹的旋风铣削

在重型机器上有许多大型内螺纹，一般大于 M56 且螺距也很大，这些内螺纹不便于用丝锥加工，也不便于车削加工，多在数控机床上采用旋风头铣削加工。本书作者研究开发出了大型内螺纹的数控加工——旋风铣削参数子程序。

1．选题意义

常用的加工内螺纹的方法有攻螺纹、车螺纹、铣螺纹等。对于中小螺纹孔（M56 以下），在有现成丝锥的情况下，选择攻螺纹没什么问题，但对于重大装备制造业中的大型内螺纹（通常在 M56～M120 范围内）的加工就没那么容易了。若用上述方法来加工大型内螺纹，要经过“一锥、二锥…”才能完成，每锥加工不可能完全重合，必然会产生螺纹牙型不重合，出现所谓的“双眼皮”，严重影响螺纹的旋合精度，甚至无法旋合而造成零件报费；其次若用上述传统的方法加工大型内螺纹，效率很低。现采用旋风铣削的方法加工大型内螺纹，可加工

M56×3～M120×9 的内螺纹，并用 R 参数子程序的方法编写程序，使用方便，非常有效。

一般在数控镗铣床上，直接装夹成形铣刀进行内螺纹的铣削和程序编制。编程中采用了参数和地址参数，程序可适用于不同直径规格的螺纹加工，对一般精度紧固螺纹的加工，此法甚为简便有效，并且低耗、高效。

在数控镗铣类机床上，内螺纹可以用攻螺纹、车螺纹或铣削螺纹来完成。在有现成丝锥，螺纹直径为非标准，或者加工材质过硬等难以加工的情况下，选择铣削加工螺纹，尤显简捷。对于精密的、孔数多的螺孔，可选英格索尔的 NC−120 内螺纹旋风铣削装置。它可严格控制中径公差，减小或消除切削时刀具对牙型的干涉。由于该装置的安装、调试和量块等准备工作繁杂、耗时冗长，故不常用。对普通螺纹的加工，常在主轴上直接装夹成形铣刀，利用数控中的螺旋插补功能来完成螺纹的铣削，较为省时、简便。其加工工艺方法和编程如下：

2. 原理和加工工艺方法

（1）加工原理和轨迹　在数控镗铣类机床上加工大型内螺纹，可采用旋风铣削的原理：高速旋转的成形铣刀，其刀尖回转圆始终与内螺纹外径处于内接状态，与此同时，刀具绕工件孔轴线作螺旋运动。此时 60° 成形铣刀把与刀尖干涉的金属切除，在工件孔壁上就切出螺纹槽。螺旋运动是通过数控机床的螺旋插补功能来实现的。为防止加工到孔底部时，切屑与刀具的干扰阻挤加工部位，并被切屑遮盖不便观察，旋风铣削均采用从孔底向外加工的进给方向。

（2）刀具和附具　内螺纹旋风铣削时，使用了 NC−120 装置上的刀片、刀盘和刀杆（图 4−14），另外还设计制造了一根专用接杆，其前面连接铣刀杆与铣刀盘，后面的锥柄与机床连接。该刀片是可转位的，为不重磨硬质合金刀片，其尺寸和角度精度较高，装于刀盘上，可同时装 4～6 把刀片，组成多刃铣刀盘。刀盘通过其尾部的定心柱和螺纹与刀杆联接，刀杆又通过尾部的短锥、键和螺钉，紧固在可装入主轴锥孔的专用接杆上。该刀具具有同时参与切削的刀具多、精度高、耐磨性好等优点，因而保证了牙型轮廓的准确性。由于刀具直接连接主轴，在选择刀盘时，主要考虑加工的螺距大小和螺孔深浅，螺孔直径不是考虑的主要因素。铣螺纹用刀具也可自行设计，但其制造精度要满足工件的要求。为保证其牙型轮廓精度和表面粗糙度，尽可能采用多刃结构。

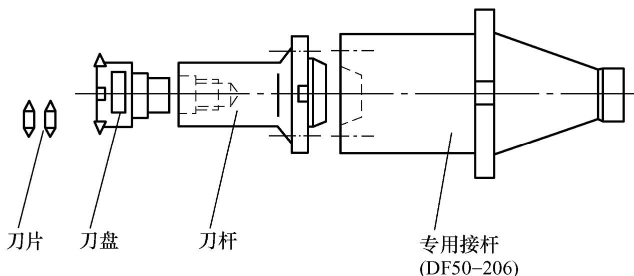


图 4−14　旋风铣削内螺纹的刀具和附具

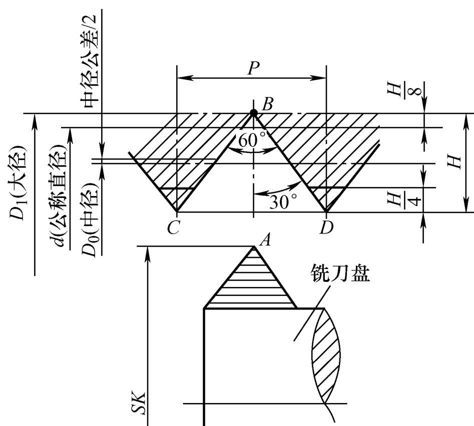


图 4−15　螺纹有关参数的计算

3. 螺纹有关参数设定

螺纹标准中规定其牙型是将等腰三角形尖峰削去一定的高度，如图 4−15 中的 $H/8$，并以此作为螺纹公称直径。

体现螺纹尺寸精度的重要标志之一是中径公差。通过对中径公差的不同取向，可达到内外螺纹配合间隙的要求。数控铣削中，为使刀尖点 A 与牙型尺寸中的点 B 重合，必须计算出螺孔的大径 D_1，如图 4-15 所示。

4. 螺纹相关尺寸计算

$$D_1 = d + 2H/8 = d + H/4$$

式中，$H = P\cos 30°$，为螺纹牙型全高；P 为螺距。

中径公差按其公差值的 1/3 考虑，则 D_1 还将加大

$$D_1 = d + H/4 + e/3$$

式中，e 为螺纹的中径公差值，一般按 H6～H7 考虑。

5. 参数的定义和轨迹

内螺纹铣削程序轨迹及参数定义如图 4-16 所示。

R01——加工螺纹公称直径。

R03——专用铣刀盘刀尖直径（SK）。

R05——加工螺纹的深度。

R06——螺纹中径的公差值。

R08——螺纹铣削进给速度。

R09——螺距。

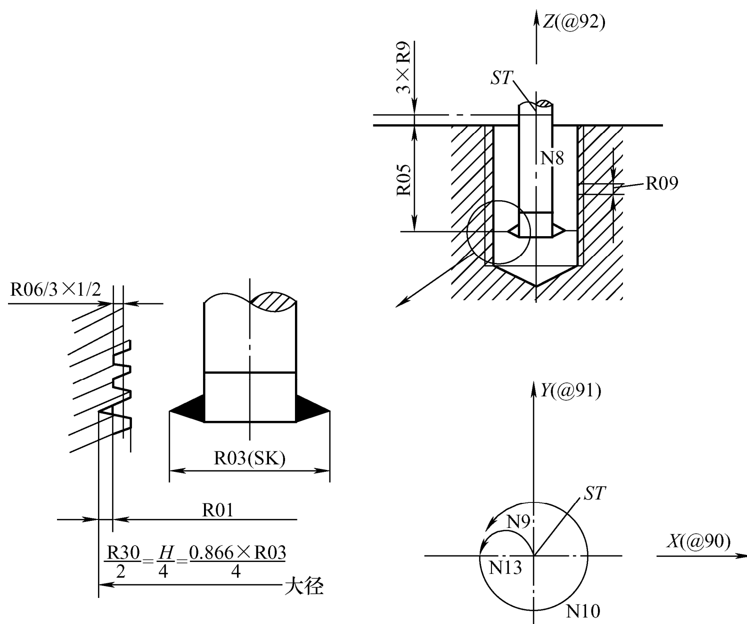


图 4-16 内螺纹铣削程序轨迹及参数定义

6. 程序编制

程序采用西门子（SINUMERIK）840D 系统的代码编写，以子程序形式编制。用 R 参数代替语句中的数码和数值，能适用于不同直径、不同螺距、不同深度的螺纹的加工，具有一定的通用性。程序按刀具中心点轨迹编写，所以没有使用刀补功能。程序可长期存入数控机

床，使用时，由主程序调用并给出切削用量、初始参数赋值和使刀具中心定位在已加工好的底孔上方即可。图 4-17 所示为旋风铣削 M120 内螺纹加工现场。

（1）用 SINUMERIK 840D 编写 *OXY* 平面上内螺纹铣削子程序

```
XUANFENG.SPF;                                  内螺纹铣削子程序名
N05 R01=R01/2 R04=0.866*R09 R04=R04/8;  螺纹参数计算
N10 R01=R01+R04 R05=3*R09＋R05;
N15 R06=R06/6 R0l=R01+R06 R0l=R01−R03/2;
N20 R02=R01/2 R30=0;
N25 G64 G91 G01 Z=−R05 F=R08 M03;       螺纹切入
N30 XUN: G03 X=−R1 Y=0 CR=R02;          旋风铣削螺纹循环
N40 G03 X=0 Y=0 I=R01 J=0 Z=R09;
N45 R30=R30+R09;
N50 IF R30<R05 GOTOB XUN;               螺纹循环条件判断
N55 G03 X=R01 Y=0 CR=R02 M05;           螺纹切出
N60 G60 G90 M17;
```

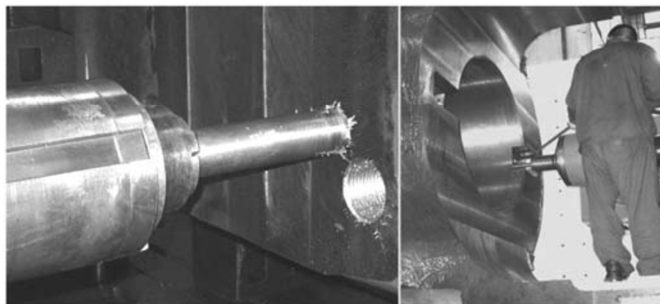


图 4-17　旋风铣削 M120 内螺纹加工现场

注意：上面的程序是按加工右旋内螺纹设计的，也可按同样方法编写左旋内螺纹的通用参数子程序。

为了适应在不同坐标平面使用，设定一个刀具轴参数 R11，以确定加工平面，R11 为刀具轴编号：*X* 轴为 R11=1，*Y* 轴为 R11=2，*Z* 轴为 R11=3。

对于在任意坐标平面上铣削内螺纹，关键是要确定螺纹轴线与哪一个坐标轴平行，也就是旋风铣削的刀具轴，设定一个刀具轴参数为 R11，表示刀具轴编号，利用@20 取地址功能码自动确定旋风铣削刀具所在轴线位置。@90，@91、@92 数控机床轴代码指令中，@90，@91 分别为加工平面的第一轴与第二轴，@92 则为垂直于该平面的第三轴，也就是刀具轴。由@20 取得的轴代码与 R11 进行比对，最后自动判断是在哪个平面上加工螺纹。

（2）任意平面上内螺纹铣削子程序　采用 SINUMERIK 8MC 编写的任意平面上内螺纹铣削子程序中，指令@20 、@90 则是自动选定内螺纹所在的坐标平面，通过无条件转移到 R11 所指定的加工平面。程序如下：

```
L891;                                   内螺纹铣削子程序名
N05 R30 0.866 R32 4 R50 0 R52 2;        螺纹参数计算
N10 R53 3 R02 0 R54 0;
N15 R30*R09 R00 0 R30 / R32;
N20 R01 R30 R00 0 R06 / R53;            R06 计算螺纹的中径公差值
N25 R01 R06 R00 0 R01−R03;
```

N30 R01 / R52 R00 0 R02 R01；	
N35 R02 / R52 R00 0 R54 R09；	
N40 R54*R51 R00 0 R05 R54；	
N45 @00 R11；	无条件转移到 R11 所指定的加工平面
N50 K1: @20 @90 2；	确定坐标轴代号，@90 第一轴代号为 2，表示 *Y* 轴
N55 @20 @91 3；	确定坐标轴代号，@91 第二轴代号为 3，表示 *Z* 轴
N60 @00 90；	无条件转移指令，转移到 N90
N65 K2: @20 @90 3；	确定坐标轴代号，第一轴代号为 3，表示 *Z* 轴
N70 @20 @91 1；	确定坐标轴代号，第二轴代号为 1，表示 *X* 轴
N75 @00 90；	无条件转移指令，转移到 N90
N80 K3: @20 @90 1；	确定坐标轴代号，第二轴代号为 1，表示 *X* 轴
N85 @20 @91 2；	确定坐标轴代号，第一轴代号为 2，表示 *Y* 轴
N90 @20 @92 R11；	@92 第三轴代号，确定刀具轴
N95 G64 G91 G01 @92–R05 FR08 M03；	螺纹深度方向下刀，R08 为下刀速度
N100 G03 @90–R01 @91 0 PR02；	半圆方式切入到最大外径，准备旋风铣削螺纹
N105 R10 100 R11；	选择螺纹加工方式所在的程序段
N110 @00 R10；	无条件转移
N115 K101: G03 @90 0 @91 0 JR01 K0 @92 R09；	在 *OYZ* 平面加工螺纹
N120 @00 140；	
N125 K102：G03 @90 0 @91 0 KR0l I0 @92 R09；	在 *OXZ* 平面加工螺纹
N130 @00 140；	
N135 K103：G03 @90 0 @91 0 IR01 J0 @92 R09；	在 *OXZ* 平面加工螺纹。螺距累加，IR01 是大写字母“I”，01 是数字“01”
N140 R50 R09；	
N145 @02 –105 R05 R50；	条件判断，当 R05>R50 时，转移到 N105 的位置
N150 G00 G60 @90 R01 M05；	G60 准确定位，回到孔中心位置
N155 G90 M17；	子程序结束

点　评

对于在任意坐标平面上铣削内螺纹，关键是要确定螺纹轴线与哪一个坐标轴平行，即自动判断是在哪个平面上加工螺纹。通过 L891（SINUMERIK 8）子程序可以实现任意坐标平面上的内螺纹铣削。

例 3：体育馆看台模型编程

如图 4-18 所示，体育馆看台模型共 10 层，最高一层长 400mm，宽 300mm，以后每层高度分别递减 5mm，每层坐台宽度依次递减 5mm，毛坯为 440mm×340mm×70mm 的实心长方体，材质为铸铁。试编写加工程序。

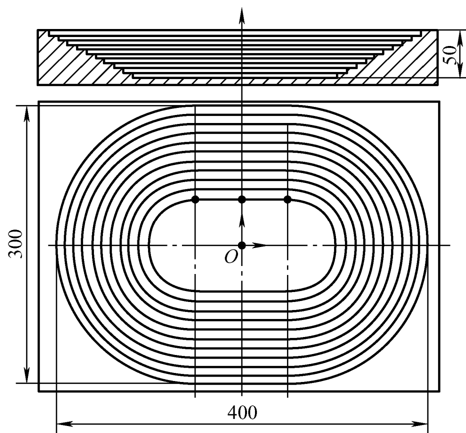


图 4-18　体育馆看台模型

1. 分析题意并拟订工艺方案

因毛坯为 440mm×340mm×70mm 的实心长方体，材质为 45 钢，要挖出内腔式的体育馆看台模型，则需要从上到下分层加工，由于看台模型的总高度仅为 50mm，也可以先将最底层加工出来，然后再从底层向上逐层加工。

从下到上的方案：先用大的刚性好的刀具把底层按“最终尺寸”加工出来，然后从底层向上逐层加工。这种方法的特点是：加工余量非常集中，下刀很困难，可以考虑先用钻头“预钻”一个孔，其钻尖刚好到达底层表面或略高 1mm，再用铣刀铣出，后面各层的加工余量逐层减少，但加工余量不均匀，特别是背吃刀量开始很大，刀具受力情况不好。

从上到下的方案：开始也是先用大的刚性好的刀具把底层加工出来，但不按“最终尺寸”加工，而是留有加工余量，目的是便于以后各次加工的“进刀”，然后再从上逐层向下加工。这种方法的特点是：钻孔及第一刀加工同前，但以后各层的加工，背吃刀量相同，刀具受力情况较好。

通过对比分析，后一种方案相对较好。拟订如下的加工工艺方案：用ϕ25mm 钻头预钻—TURN 旋铣—轮廓铣削。先用ϕ25mm 钻头在工件的中心位置钻出深度为 49mm 的孔（深度包括钻尖在内），然后采用 TURN 旋铣方式，即一边走圆弧一边下刀的螺旋铣削，形成一个ϕ170mm 的大孔，方便铣削各层轮廓时下刀。

2. 刀具的选择

由于加工余量是不均匀的，为了提高效率，选择硬质合金刀具。刀具半径 R05 主要根据加工面积及深度来确定。工件有效面积是不断变化的，顶层最大，为 400mm×300mm，底层最小，为 300mm×200mm，若刀具半径太小，进给的次数就很多，若刀具半径太大，加工底层的最小面积就受到限制，因此，应根据底层最小的面积确定所用刀具的最大尺寸。

根据经验，按底层最小的面积考虑，大约是 2/3～3/5 的槽宽。所以刀具半径为（1/5～1/3）R02=40～67.5，可选用ϕ90mm 或ϕ100mm 硬质合金立（或端面）铣刀，决定选取ϕ90 硬质合金立铣刀，型号为 1513.003/90.114，刀具直径 D=90mm，刃长 l=114mm，总长 L=299mm，锥柄为 50#，齿数 Z=6，如图 4-19 所示。

铣削之前，先要在实心毛坯上加工出落刀孔，如图 4-20 所示。为此，先编制钻孔及 TURN 旋铣程序。

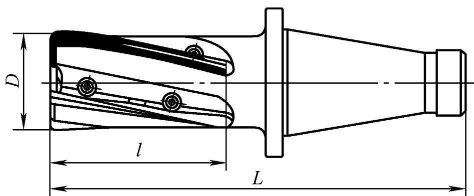


图 4-19　体育馆看台模型加工用的 TURN 旋铣刀具

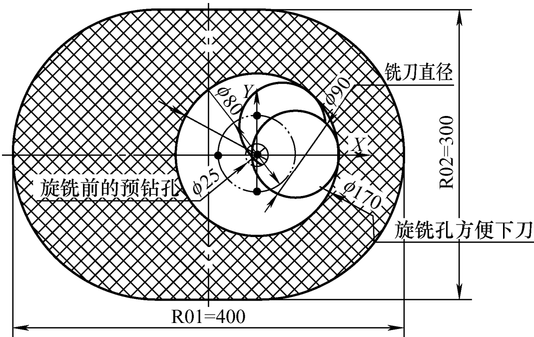


图 4-20　体育馆看台模型顶层 TURN 旋铣

3. 钻孔及落刀孔 TURN 旋铣程序

程序如下：

ZHANXUAN.MPF；	落刀孔加工主程序
N05 G90 G54 G00 X0 Y0 Z100；	到达起始孔ϕ170mm 中心点，高度安全位置
N10 T01 D01；	手动换刀，ϕ25mm 麻花钻头
N15 M03 S600 F180	
N20 R01=400 R02=300；	R01 为顶层的槽长，R02 为顶层的槽宽

```
N25 G00 X0 Y=R01-R02;                    走到钻孔位置
N30 CYCLE83( 10,  0,  5,  , 49.5,  ,  15,  5, 0.5,  1, 0.8,  1)
与 CYCLE83 (RTP, RFP, SDIS, DP, DPR, FDEP, FDPR, DAM, DTB, DTS, FRF, VARI)
                                         各项对应，逗号不能少
N35 G01 Z=100;                           抬刀
N40 T02 D02;                             手动换刀，φ90mm 硬质合金立铣刀
N45 M03 S600 F180;
N50 G00 X0 Y0 Z50;                       刀具接近工件 X 起始位置
N55 G00 Z5;                              刀具快速接近工件
N55 G01 X=170-45;                        旋铣半径-刀具半径，刀具走到旋铣起点
N60 G03 X=170-45 Y0 Z-49 I-40 J0 TURN=10;  旋铣到深度为 49mm，每圈铣 5mm 深
M65 G01 X0 Y0;                           回到孔中心
N70 G00 Z50;                             抬刀
N75 M30;                                 程序结束
```

4. 铣削各层轮廓

铣削各层轮廓是本例的关键，根据上述分析可知，决定选用ϕ90mm 硬质合金立铣刀，进给路线设计如图 4-21 所示，1—2—3—4…是刀具中心运动轨迹，P_2—P_3—P_4 等是加工轮廓控制点，加工时，从 1 点开始下刀，沿 1、2、3、4 等各点进给完成底面加工，达到 4 点时，开始切入工件轮廓 P_2 点。这里是采用了内轮廓过渡圆弧切入与切出的方式，达到轮廓光滑过渡而不留刀痕的目的，从 P_2 点开始切入，经过 $P_2 \to P_3 \to P_4 \to P_5$ 回到 P_2，完成轮廓加工，圆弧切出 P_6 点之后直接走空间斜线，走到下一层的起点 1 的位置（注意要取消刀补）。

从图 4-21 可以看到，用ϕ90mm 的硬质合金立铣刀在加工顶层时，还有 14mm 宽的“环形岛”没有加工到，当加工下一层或再下一层时，这些“环形岛”就被加工掉了。

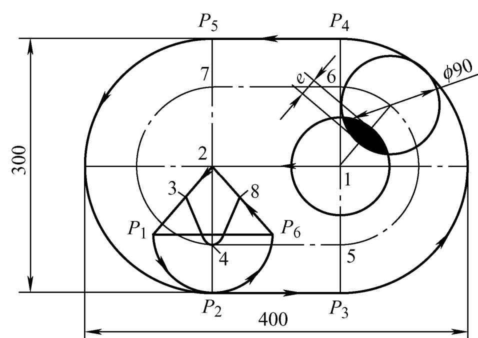


图 4-21 体育馆看台模型铣削进给路线

5. 过渡圆半径的选择

过渡圆是为了保证刀具能够圆弧切入与切出工件，其半径应该大于刀具半径，且小于加工圆半径。根据经验，过渡圆半径设为槽宽的 3/8～2/5，即 R04=（1/4～2/5）R02=（1/4～2/5）×200mm=40～80mm，还要满足下面的关系式：（R05=45mm）＜R04＜（R02/2=100mm），故确定过渡圆半径 R04=70mm。

6. 加工各层的 R 参数子程序

体育馆看台模型共由十层构成，且每层都有规律可循，为了减小编程工作量，很有必要采用 R 参数子程序方式编写。看台模型各层加工的进给路线如图 4-22 所示，各层参数设计为：R01=各层槽的长度（400mm−n×2×5mm），R01=各层槽的宽度（300mm−n×2×5mm），R03=各层槽的深度（5mm），R04=过渡圆半径（70mm），R05=刀具半径（45mm）。

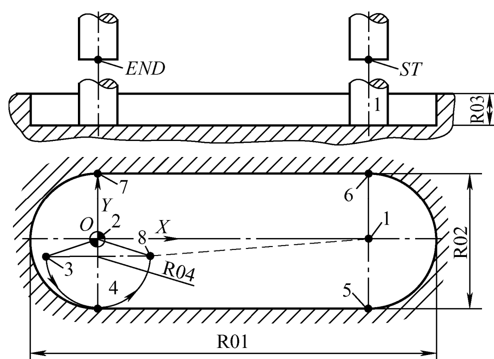


图 4-22 体育馆看台模型各层加工的进给路线

体育馆看台模型各层参数子程序如下：

```
KAITAI.SPF;                                  看台各层加工子程序
N05 G90 G01 X0 Y0;                           槽的中间先加工一刀（1—2 点）
N10 G41 D02 X=-R04 Y=-（R02/2-R04）;         建立刀补（2—3 点）
N15 G03 X0 Y=-R02/2 CR=R04;                  圆弧切入（3—4 点）
N20 G01 X=R01-R02 Y=-R02/2;                  加工下直边（4—5 点）
N25 G03 X=R01-R02 Y=R02/2 CR=R02/2;          加工右半圆（4—6 点）
N30 G01 X=0 Y=R02/2;                         加工上直边（6—7 点）
N35 G03 X=0 Y=-R02/2 CR=R02/2;               加工左半圆（7—4 点）
N40 G03 X=R04 Y=R04 CR=R04;                  圆弧切出（4—8 点）
N45 M17
```

7．体育馆看台模型加工主程序

体育馆看台模型共十层，每层都有规律为：槽的长度、宽度都是逐层减少 10mm，可用 R01=各层槽的长度（400mm−n×2×5mm），R02=各层槽的宽度（300mm−n×2×5mm）来表示，n 为层数，因此可利用循环方式编写主程序。

参数设计：R20=层数计数器。

程序如下：

```
WGEWJX.MPF;
N05 G90 G54 G00 X0 Y0 Z40;                   到达起始（ST）点，工件之外的安全位置
N10 M03 S600 F180;
N15 R01=400 R02=300 R03=5 R04=70 R05=45;     给各 R 参数赋值，并用空格隔开
N20 R20=0;                                   计数器清零，从“0”开始计数，加工第“0”层
N25 G01 Z=-R05;                              下刀（第一次下刀位置）
N30 IF R20==0 GOTOB KP;                      注意“==”是两个“=”，是比较符号，表示相符
N35 KP1：G01 G41 D00 X0 Y=R01-R02 Z=IC(-5);
                                             走空间斜线，到下一层的起点 1
N40 KP: KAITAI;                              调用看台各层加工子程序
N45 R20=R20+1;                               加工第一层，并开始计加工的层数
N50 R01=400-2*5 R02=300-2*5;                 计算下一层的槽长与槽宽
N55 IF R20<=9 GOTOB KP1;                     层数判断，确定循环的终止条件
N60 G01 G41 D00 X0 Y0;                       取消刀补，回到 2 点
N65 G00 Z40 M05;                             抬刀到结束（END）点，结束加工
M70 M30;                                     注意程序中的乘号只能用“*”
```

点　评

本例为实心零件“分层多次式”的粗加工提供了参考范例。工厂中有很多零件的毛坯都是实心的（实体零件），需要“分层多次式”的粗加工，这就要求考虑“选刀、下刀、各层之间的关系如何处理”等问题，本例可提供借鉴。

4.5　方程曲线的参数编程

相关知识点

一般构成零件轮廓的曲线有以下三种：

1．仅由圆弧和直线组成的曲线

对于这种零件轮廓，由于数控装置一般都具有直线插补和圆弧插补功能，因此，只需要计算各基点坐标。所谓基点，即两相邻几何元素的交点或切点。

2．可以用已知方程描述的曲线

对于这类曲线，若数控装置的插补功能与零件轮廓相符合，则只进行基点计算，否则还要进行节点计算。所谓节点，就是按照编程允许误差，用直线插补或圆弧插补去逼近零件轮廓曲线时，相邻两直线段或圆弧的交点或切点。

3．列表曲线

不能用特征方程描述，而是以离散的坐标点给出的曲线称为列表曲线。对于这类曲线，首先要构造一条样条曲线，建立数学模型，即第一次逼近；再按照处理第二类曲线的数学处理方法，进行基点和节点的计算。

本节主要对二次曲线方程构成的零件轮廓进行编程，应掌握其中一些方法与技巧。所谓二次曲线是指具有二次方程作为数学模型的曲线轮廓，如抛物线、双曲线、椭圆等。对于二次曲线的编程，简单分为四个步骤：①参数定义；②计算点坐标；③插补；④循环判断。

例 1：椭圆方程曲线轮廓 R 参数编程

如图 4-23 所示，该零件的主要外形是由椭圆方程曲线构成的平面轮廓凸台，椭圆的长轴为 100mm，短轴为 50mm，凸台高度为 6mm，毛坯为 130mm×60mm×26mm 的实心长方体，材质为 45 钢。试编写加工程序。

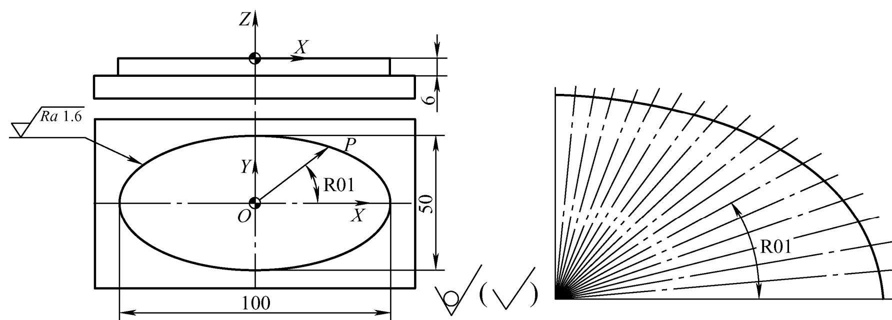


图 4-23　椭圆平面轮廓凸台

1．工艺分析

零件外形规则，图中仅是椭圆轮廓要加工，表面粗糙度等有一定要求，其余为非加工表面，可预先在铣床上加工出工件的上、下表面及四周轮廓，表面粗糙度达 *Ra*6.3μm即可，以便加工椭圆轮廓时的装卡与找正。工件装夹：选用机用虎钳装夹工件，找正机用虎钳固定钳口与工作台 *X* 轴移动方向平行。毛坯铣削完毕后，在工件下表面与机用虎钳之间放入厚度适当的平行垫块，工件装夹前用百分表检测垫块表面的平面度，工件露出钳口表面不低于 10mm，利用木锤或铜棒敲击工件，使平行垫块不能移动后，再夹紧工件。找正工件 *X* 轴、*Y* 轴零点位于工件对称中心位置。工件上表面为执行刀具长度补偿后的 *Z* 零点表面，选用 ϕ20mm 平底键槽铣刀加工椭圆外形轮廓，达到尺寸要求。刀具与切削参数见表 4-3。

表 4-3　刀具与切削参数

加 工 工 序	刀具与切削参数						
加工内容	刀具规格			主轴转速/（r/min）	进给速度/（mm/min）	刀具补偿	
	刀号	刀具名称	材料			长度	半径
椭圆外形	T01	ϕ20mm 平底键槽铣刀	硬质合金	1200	600	—	D01

2. 编程思路

利用椭圆方程与参数方程进行编程，分别如下：

椭圆的标准方程　$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$$

椭圆的参数方程　$x=a\cos\beta$，$y=b\sin\beta$

式中，a 为椭圆长半径；b 为椭圆的短半径；β 为 0°～360°范围内的任意角度。

应用 R 参数及循环功能来编写参数程序，下面是椭圆程序编制的关键步骤：

（1）参数定义　参数β用 R01 代替。

（2）计算点坐标　椭圆的参数方程式为 $x=a\cos\beta$，$y=b\sin\beta$，只要确定了β即 R01 的值，就可获得椭圆上点的 X、Y 坐标。

（3）插补　完成每次计算后的进给，以“直线逼近”的插补方式进行，根据零件加工误差要求，只要控制好β的变化（称为插补步长，其大小由加工误差确定）即可；根据零件加工误差，现取步长β=1°，每走一步，进行角度累加，见程序中的 N30 段。

（4）循环判断　每走一步，进行角度累加，当加工角度小于 360°时继续，一直加到等于 360°后就结束循环，见程序中的 N40 段。

3. 加工程序

程序如下：

```
TUOYUAN.MPF;                             加工椭圆方程曲线轮廓主程序名
N05 G54 G64 F150 S800 M03 T01;           设定零件的零点及加工参数
N10 G00 X60 Y−60 Z20;                    刀具在工件之外安全位置起刀
N15 G01 Z−6 F100;                        下刀
N20 G01 G42 D01 X50 Y0;                  完成刀补，切入工件（50，0）处
N25 R01=0;                               初始角度为 0°
N30 MM：R01=R01+1;                       设定步长为 1°，即分成 360 等分加工
N35 G01 X=50*COS (R01) Y=25*SIN (R01);   计算各节点坐标，完成直线插补
N40 IF R01<=360 GOTOB MM;                循环判断，直到等于 360°时与切入点重合
N45 X0 Y20;                              切出工件
N50 G00 Z20;                             抬刀
N55 G00 D00 X60 Y−60;                    取消刀补，回到起点
N60 M30;                                 程序结束
```

本例编写的是一个长半径为 50mm、短半径为 25mm（x=50cosβ，y=25sinβ）的“死”椭圆的加工程序（长、短半径固定的椭圆称为“死”椭圆），而且还是一个完整的“死”椭圆。若要编写一个长、短半径任意的“活”完整椭圆或部分椭圆，只要长、短半径是任意的参数，部分椭圆的起始角度也是任意的参数即可。

点 评

椭圆的加工程序在很多教材中讲过，也有很多种编程方法，这仅是其中的一种。在后面，还将讲到椭圆球的加工，若是以椭圆为母线的回转体椭圆球，则在车床上车削加工的方法与此差不多；若不是回转体椭圆球则不能用上述方法，详见后面章节。

例 2：抛物线方程曲线轮廓 R 参数编程

如图 4-24 所示，该零件的主要外形是由两条抛物线方程曲线与直线围成的平面轮廓凸台，下抛物线方程为 $y=0.02x^2$，上抛物线方程为 $y=0.01x^2$。由于抛物线方程的系数 0.01 和 0.02 均大于 0，故两抛物线的开口均向上。通过两条直线与两条抛物线方程曲线围成的封闭图形构成的平面轮廓，其表面粗糙度要求为 *Ra*1.6μm，毛坯为实心的 180mm×126mm×60mm 的实心长方体，材质为 45 钢，试编写加工程序。

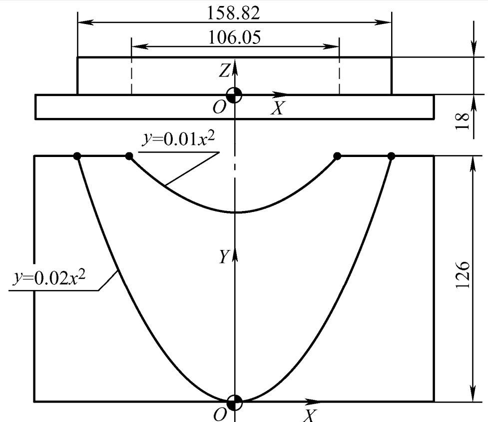


图 4-24 抛物线方程曲线轮廓工件

1．课题分析

本例工件的外形轮廓为抛物线方程曲线表示的非圆曲线轮廓，同前例，宜采用 R 参数编程的方式对抛物线曲线方程进行直线段拟合。参数编程时，以 *X* 为自变量，*Y* 为因变量，因此采用直角坐标系编程就很方便。由于是外轮廓，为了方便切入和切出，采用轮廓延长线方式，因此起刀点设在（*X*120，*Y*126）的位置，退刀点设在（*X*100，*Y*160）的位置。

2．工件的装夹

零件外形为矩形，图中仅是抛物线曲线与直线围成的轮廓要加工，表面粗糙度 *Ra*1.6μm，其余为非加工表面，可预先在铣床上加工工件的上、下表面及矩形周边，至表面粗糙度值达 *Ra* 6.3μm 即可，以便加工轮廓时的装夹与找正。选择立式数控铣床加工“抛物线方程曲线”轮廓形状工件。

选用压板、螺杆装夹工件。在毛坯铣削完毕后，先在铣床工作台上放上等高块，找正各等高块的高度；放上工件，利用木锤或铜棒敲击工件，打表找正工件后，再用压板、螺杆夹紧工件。注意防止压板、螺杆夹紧工件的位置不当而与刀具发生碰撞。工件零点位置如图 4-24 所示。工件上 *Z* 轴零点表面位置为执行刀具长度补偿后的位置，选用 ϕ32mm 的立铣刀加工外形轮廓，至达到尺寸要求。刀具与切削参数见表 4-4。

表 4-4 刀具与切削参数

加工内容	刀具规格			主轴转速/（r/min）	进给速度/（mm/min）	刀具补偿	
	刀号	刀具名称	材料			长度	半径
曲线轮廓外形	T02	ϕ32mm 立铣刀	硬质合金	1000	500	H02	D02

3．编制程序

程序如下：

```
PAOWUXIAN.MPF;                      加工抛物线方程曲线轮廓主程序名
N05 G54 G64 F200 S800 M03 T01;      设定零件的零点及加工参数
N10 G00 X100 Y126 Z30;              刀具在工件之外安全位置起刀
```

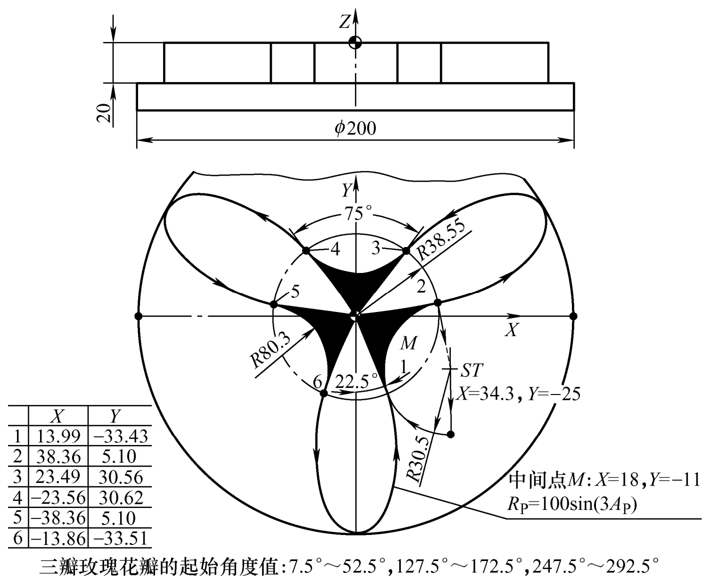
```
N15 G01 Z0 F100;                          下刀
N20 G01 G42 D02 X=180/2 Y126;             完成刀补，开始切入工件（毛坯位置）
N25 X=106.05/2;                           加工水平直边
N30 R01=106.05/2;                         赋初始值给 R01
N35 PA01：R01=R01−0.5;                    设定步长为 0.5mm，即 ΔX=0.5 等分插点加工
N40 G01 X=R01 Y=0.01*R01*R01;             计算各节点坐标，并完成直线插补
N45 IF R01<=−106.05/2 GOTOB PA01;         循环判断，直到 X=106.05/2 止
N50 X=−158.82/2;                          加工水平直边
N55 R02=−106.05/2;                        赋初始值给 R02
N60 PA02：R01=R01+0.25;                   设定步长为 0.25mm，即 ΔX=0.25 等分插点加工
N65 G01 X=R1 Y=0.02*R01*R01;              计算各节点坐标，并完成直线插补
N70 IF R01<=158.82/2 GOTOB PA02;          循环判断，直到 X=158.82/2 止
N75 D00 X100 Y160;                        取消刀补，回到起点
N80 G00 Z30;                              抬刀至安全位置
N85 M30;                                  程序结束
```

例 3：玫瑰花瓣方程曲线轮廓 R 参数编程

图 4-25 所示为玫瑰花瓣方程曲线轮廓工件，其主要外形是由极坐标方程表示的平面曲线构成的平面轮廓凸台。玫瑰花瓣方程为 R_P=100sin（3A_P），其中 100 表示玫瑰花外接圆半径，3 表示玫瑰花瓣的数量，A_P 为极角，取值范围为 0°～360°，但是在每两个花瓣间有 R30.5mm 的圆弧相连，也就是说，极角 A_P 的取值在 0°～360° 范围内间断的，即：7.5°～52.5°，127.5°～172.5°，247.5°～292.5°。毛坯尺寸为 ϕ200mm×50mm，试编写其加工程序。

1．题意分析

本例工件的外形轮廓为非圆曲线，宜采用参数编程的方式对这些曲线进行直线段拟合。参数编程时以极角为自变量，极半径为因变量，因此采用极坐标编程就很方便。为了方便切入与切出，设计了 R30.5mm 圆弧切入，切出时，为了避免重复切削，设计了一个比 R30.5mm 小的圆弧切出，见图中的 M 点，由圆弧的起点、中间点、终点三点所构成的圆弧作为切出的过渡圆弧，并用“CIP X38.36 Y5.1 I1=17 J1=−18；”程序实现加工。



	X	Y
1	13.99	−33.43
2	38.36	5.10
3	23.49	30.56
4	−23.56	30.62
5	−38.36	5.10
6	−13.86	−33.51

图 4-25　玫瑰花瓣方程曲线轮廓工件

2. 工件的装夹

零件外形为圆柱形，图中仅是玫瑰花瓣轮廓要加工，表面粗糙度等有一定要求，其余为非加工表面，可预先在车床上车出工件的外圆及端面，至表面粗糙度值达 *Ra* 6.3μm 即可，以便加工轮廓时的装夹与找正。选择立式数控铣床加工玫瑰花瓣方程曲线轮廓工件。

工件装夹：选用自定心卡盘装夹工件，先将自定心卡盘固定在铣床工作台上，找正自定心卡盘与工作台面平行。毛坯铣削完毕后，在工件下表面垫上厚度适当的垫块，工件露出自定心卡盘表面不低于 30mm，利用木锤或铜棒敲击工件，使平行垫块不能移动后，再夹紧工件。找正工件 *X* 轴、*Y* 轴零点位于工件对称中心位置。工件上表面为执行刀具长度补偿后的 *Z* 零点表面，选用 ϕ24mm 立铣刀加工玫瑰花瓣方程曲线轮廓，至达到尺寸要求。刀具与切削参数见表 4-5。

表 4-5 刀具与切削参数

加 工 内 容	刀 具 规 格			主轴转速/（r/min）	进给速度/（mm/min）	刀 具 补 偿	
	刀号	刀具名称	材料			长度	半径
玫瑰花瓣方程曲线轮廓	T01	ϕ24mm 立铣刀	硬质合金	1000	500	H01	D01

3. 编制程序

程序如下：

```
MEIGUIHUA.MPF;                          加工玫瑰花方程曲线轮廓主程序名
N05 G54 G64 F150 S800 M03 T01;          设定零件的零点及加工参数
N10 G00 X100 Y−100 Z20;                 刀具在工件之外安全位置起刀
N15 G01 Z−20 F100;                      下刀
N20 G01 X34.3 Y−25;                     走到起刀点 ST
N25 G42 D01 X34.3 Y−55.5;               完成刀补
N100 G02 X38.36 Y5.1 CR=30.5;           切入工件并加工 R30.5mm 圆弧，到达 2 点
N105 R01=7.5;                           设定第一个“玫瑰花瓣”的初始角度
N110 MM1: R01=R01+0.5;                  设定步长为 0.5mm，计算各插补点的极坐标角度
N115 G111 X0 Y0;                        设定极心位置
N120 AP=R01;                            当前点极角赋值，该段可以与 N130 合并
N125 RP=100*SIN(3*AP);                  当前点极半径赋值，该段可以与 N130 合并
N130 G01 RP=100*SIN(3*R01) AP=R01;      以极坐标方式走直线进行插补加工花瓣
N135 IF R01<=52.5 GOTOB MM1;            循环判断，大于 52.5°，第一个“玫瑰花瓣”加工结束
N200 G02 X−23.56 Y30.62 CR=30.5         切入工件并加工 R30.5mm 圆弧，到达 4 点
N205 R01=127.5;                         设定第二个“玫瑰花瓣”的初始角度
N210 MM2：R01=R01+0.5;                  设定步长为 0.5mm，计算各插补点的极坐标角度
N215 G111 X0 Y0;                        设定极心位置
N220 AP=R01;                            当前点的极角
N225 RP=100*SIN(3*AP);                  当前点的极半径
N230 G01 RP=100*SIN(3*R01) AP=R01;      以极坐标方式走直线进行插补加工花瓣
N235 IF R01<=172.5 GOTOB MM2;           循环判断，到 172.5°，第二个“玫瑰花瓣”结束
N300 G02 X−13.86 Y−33.51 CR=30.5;       切入工件并加工 R30.5mm 圆弧，到达 6 点
N305 R01=247.5;                         设定第三个“玫瑰花瓣”的初始角度
N310 MM3：R01=R01+0.5;                  设定步长为 0.5mm，计算各插补点的极坐标角度
N315 G111 X0 Y0;                        设定极心位置
N320 AP=R01;                            当前点的极角
N325 RP=100*SIN(3*AP);                  当前点的极半径
N330 G01 RP=100*SIN(3*R01) AP=R01;      以极坐标方式走直线进行插补加工花瓣
```

N335 IF R01<=292.5 GOTOB MM3；	循环判断，到 292.5°，第三个“花瓣”结束
N400 CIP X38.36 Y5.1 I1=17.J1=−18；	切入工件并加工 *R*30.5mm 圆弧，到达 6 点
N405 X0 Y20；	切出工件
N410 G00 Z20；	抬刀
N420 G00 D00 X60 Y−60；	取消刀补，回到起点
N425 M30；	程序结束

本程序段的编号是这样安排的：

N05～N25：本程序的准备部分。

N100～N135：加工第一个“玫瑰花瓣”。

N200～N235：加工第二个“玫瑰花瓣”。

N300～N335：加工第三个“玫瑰花瓣”。

N400～N425：本程序的结束部分。

4.6　立体曲面加工

相关知识点

FANUC 宏指令 G65

通过宏指令 G65 可以实现丰富的宏功能，包括算术运算（表 4-6）、三角函数（表 4-7）、控制类指令（表 4-8）处理等功能。

宏指令的一般形式为：

G65 Hm P#i Q#j R#k；

式中：

m——宏程序功能，数值范围为 01～99。

#i——运算结果存放处的变量名。

#j——被操作的第一个变量，也可以是一个常数。

#k——被操作的第二个变量，也可以是一个常数。

例如，当程序功能为加法运算时：

G65 P#100 Q#101 R#102；	含义为#100=#101＋#102
G65 P#100 Q−#101 R#102；	含义为#100=−#101＋#102
G65 P#100 Q#101 R15；	含义为#100=#101＋15

表 4-6　FANUC 宏指令——算术运算

G 码	H 码	功　能	定　义
G65	H01	定义，替换	#i=#j
G65	H02	加	#i=#j＋#k
G65	H03	减	#i=#j-#k
G65	H04	乘	#i=#j×#k
G65	H05	除	#i=#j/#k
G65	H21	平方根	#i=√#j
G65	H22	绝对值	#i=|#j|

（续）

G 码	H 码	功　能	定　义
G65	H23	求余	#i=#j−trun#j/#k×#k Trun：丢弃小于 1 的分数部分
G65	H24	BCD 码→二进制码	#i=BIN（#j）
G65	H25	二进制码→BCD 码	#i=BCD（#j）
G65	H26	复合乘/除	#i=（#i×#j）/#k
G65	H27	复合平方根 1	$\#i=\sqrt{\#j^2+\#k^2}$
G65	H28	复合平方根 2	$\#i=\sqrt{\#j^2-\#k^2}$

表 4-7　FANUC 宏指令——三角函数

G 码	H 码	功　能	定　义
G65	H31	正弦	#i=#j×SIN（#k）
G65	H32	余弦	#i=#j×COS（#k）
G65	H33	正切	#i=#j×TAN（#k）
G65	H34	反正切	#i=ATAN（#j/#k）

例如，当程序功能为三角函数运算时：

（1）正弦函数 #i=#j×SIN (#k)　编程格式为

G65 H31 P#i Q#j R#k；

例：G65 H31 P#101 Q#102 R#103；　#101=#102×SIN(#103)

（2）余弦函数 #i=#j×COS (#k)　编程格式为

G65 H32 P#i Q#j R#k；

例：G65 H32 P#101 Q#102 R#103；　#101=#102×COS(#103)

（3）正切函数 #i=#j×TAN#k。

表 4-8　FANUC 宏指令——控制类指令

G 码	H 码	功　能	定　义
G65	H80	无条件转移	GOTO n
G65	H81	条件转移 1	IF # j=# k，GOTO n
G65	H82	条件转移 2	IF # j≠# k，GOTO n
G65	H83	条件转移 3	IF # j>＃k，GOTO n
G65	H84	条件转移 4	IF # j<＃k，GOTO n
G65	H85	条件转移 5	IF # j≥# k，GOTO n
G65	H86	条件转移 6	IF # j≤# k，GOTO n

例如，当程序功能为控制类指令时：

G65 H82 P1000 Q#101 R#102；若#101≠ #102，转移到 N1000 程序段；若#101=#102，执行下一程序段。

G65 H83 P1000 Q#101 R#102；若#101>#102，转移到 N1000 程序段；若#101≤#102，执行下一程序段。

G65 H84 P1000 Q#101 R#102；若#101<#102，转移到 N1000；若#101≤#102，执行下一程序段。

例 1：应用宏指令加工空间立体曲面

图 4-26 所示的空间曲面槽是由一条余弦曲线 y=38cos$x$ 和一条正弦曲线 z=18sin$x$ 叠加而成的，毛坯尺寸为 400mm×144mm×62mm，外形已加工好，本工序只需在数控铣床上加工出

空间曲面槽，刀具中心轨迹如图 4-26 所示，槽底为 *R*12.5mm 的圆弧，试编写加工程序。

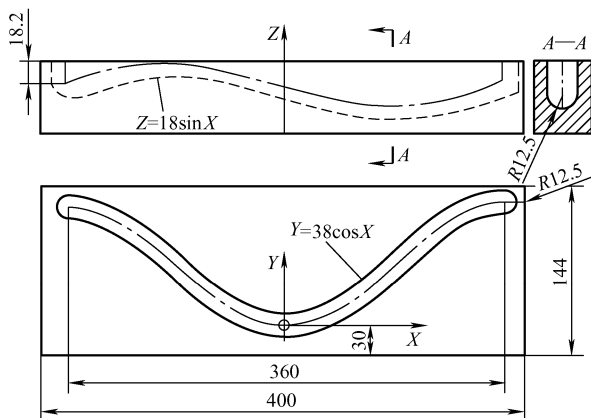


图 4-26　由三角函数构成的空间曲面槽

1. 题意分析

既然工件的槽底为 *R*12.5mm 的圆弧，且刀具中心轨迹已给定，那么就可以直接选用 *R*12.5mm 的球头铣刀来加工。

为了方便编制程序，以角度 *X* 为变量，取相邻两点间的 *X* 向距离相等，间距为 0.5°，然后用余弦曲线 *Y*=38cos*X* 方程和正弦曲线 *Z*=18sin*X* 方程分别计算出各点对应的 *Y* 值和 *Z* 值，进行空间直线插补，以空间直线来逼近空间曲线。加工时，采用不带摆动轴的球头铣刀近似铣削出这一空间曲线槽。如图 4-27 所示，从左到右加工，即−180°～180°。

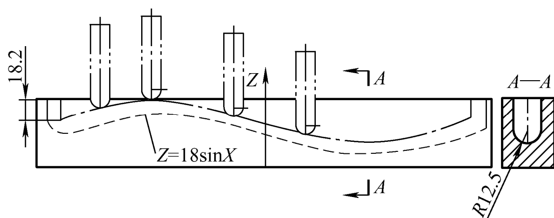


图 4-27　采用球头铣刀（不带摆动轴）加工空间曲面槽

2. 变量设定

设置保持型变量：

#500：*Z* 向每次切入量为 1mm；设置时输入“1000”。

#501：在 *OXY* 平面 *Y*=38cos*X* 的幅值为 38mm，设置时输入“38000”。

#502：在 *OXZ* 平面 *Z*=18sin*X* 的幅值为 18mm，设置时输入“18000”。

#503：自变量 *X* 的步距为 0.5°，终点值 180°，设置时输入“180”。

设置操作型变量：

#100：*X* 当前值，单位为（°）。

#110：*Y* 坐标当前值，单位为 mm。

#120：*Z*=18sin*X* 的值，单位为 mm。

#130：*Z* 向每次进刀后的初始值，单位为 mm。

#140：*Z* 坐标当前值，单位为 mm，*X*=−180°时，*Z*=−18.2mm。

3．编制程序

（1）子程序　程序如下：

```
O1008;                                  子程序
N05 G65 H01 P#100 Q–180;                X 初始值#100=–180°
N10 G91 G01 Z–#500 F100;                Z 向切入零件
N15 G65 H02 P#130 Q#130 R–#500;         #103=#103+(–#500)
N20 G65 H02 P#100 Q#100 R0.5;           X 当前值#100=#100+0.5
N25 G65 H32 P#110 Q#501 R#100;          Y 当前值#110=38cosX
N30 G65 H31 P#120 Q #502 R#100;         Z=18sinX 数值
N35 G65 H02 P#140 Q #130 R#120;         Z 当前值#140=#130+#120
N40 G90 G01 X#100 Y#110 Z#140;          切削空间直线
N45 G65 H84 P–20 Q#100 R#503;           H84 终点判别，若#100<#503，转移到 N20；
N50 G91 Z25;                            抬刀
N55 G90 X0 Y0;                          回加工原点
N60 G91 G01 Z–15 F200;                  下刀
N65 M99;                                子程序结束
```

（2）主程序　程序如下：

```
O2011;                                  主程序
N10 G54 G90 X0 Y0 Z35;                  进入加工坐标系
N20 G00 X–180 Y0;                       到起始位置
N30 G01 Z10 M03 S600 F200;              主轴起动
N40 G65 H01 P#130 Q0;                   Z 向初值为 0
N50 G01 Z0;                             下刀至零件表面
N60 M98 P31008;                         调用于程序 O1008 三次
N70 G00 Z15;                            抬刀
N80 M30;                                主程序结束
```

在子程序 O1008 中，N20～N30 为计算当前点的 *X*、*Y* 和 *Z* 坐标。N35 是按计算出的坐标值切削一段空间直线，用直线逼近空间曲线。N45 为空间曲线结束的终点判别，以 *X*=360° 为终点，若没有到达，则返回 N20 再计算下一点坐标；若已到达，则结束子程序。

在主程序 O2011 中，N60 为调用三次 O10084 子程序，每调用一次，*Z* 坐标向负方向进 1mm，分三次切出至槽深度。

上述加工方法，是采用球形铣刀（不带摆动轴）在一平面实体零件上（近似）铣削出这一空间曲线槽的。

采用球头铣刀（不带摆动轴）加工空间曲面槽属于近似加工，存在加工原理误差，只有带摆动轴的数控机床才能实现无原理误差的加工，如图 4-28 所示。

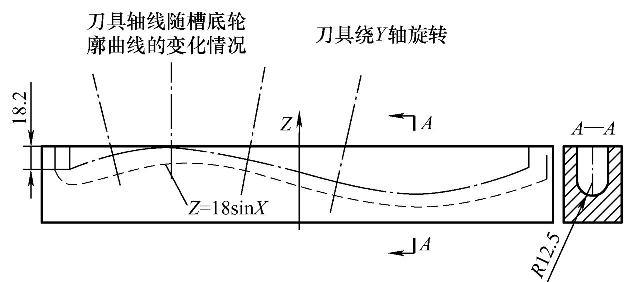


图 4-28　采用球头铣刀（带摆动轴）加工空间曲面槽

4. 实现轴的摆动的主要途径

1）当摆动角是一个固定角度时，可采取将工件转一个角度，俗称“摆活”，以实现刀具轴线与槽底轮廓线垂直，这是许多工厂最现实的做法，其难易程度取决于零件的形状与尺寸大小。

2）通过机床附件实现。采用角度铣头，使刀具轴线与槽底轮廓线垂直。

3）数控旋转轴。通过数控机床的摆动轴使刀具轴线与槽底轮廓线垂直，这是一个带有 *C* 轴的数控镗床。

5. 基本对策

1）工件转一个角度，往往会给装夹带来一定困难，可根据现场情况采用通用工装，有时还要设计专用工装，可通过工装解决定位与夹紧。

2）采用角度铣头，是最常见的做法，这当然取决于机床附件的配置情况，也可根据零件的特点，配置专用角度铣头或万能铣头。

3）带有数控旋转轴的则是一些高档数控机床，用其加工槽的精度很高，也很方便，但成本会成倍增加，可根据实际情况（主要是技术、经济指标）而定。

例 2：立体半椭球的加工

图 4-29 所示的椭圆球参数尺寸如下：长轴半径为 R10，短轴半径为 R11，椭球高度为 R12，试用参数方式编写半椭圆球通用子程序，并编写一个长轴半径为 300mm，短轴半径为 160mm，高度为 80mm 的半椭球加工程序。毛坯为实心的 360mm×200mm×80mm 的长方体，材质为 45 钢。

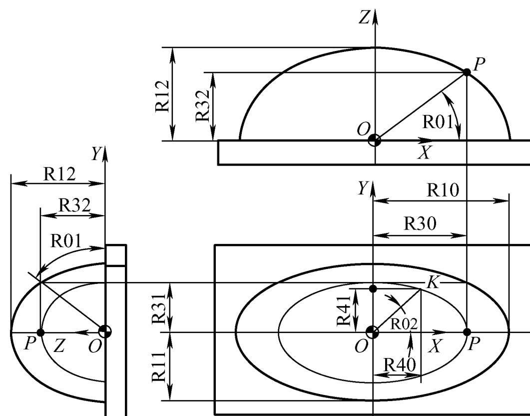


图 4-29　任意立体半椭球的加工

1. 工艺分析

以椭圆为母线的回转体椭圆球在车床上车削加工很容易，而现在的椭圆球零件，在任何一个轴上的截面均不是一个圆，因而是无法在车床上车削加工的。零件外形是立体半椭球的规则曲面，图中仅是半椭球要加工，表面粗糙度值按 *Ra*3.2μm，其余为非加工表面，可预先在铣床上加工出工件的上、下表面及四周轮廓，以便加工椭圆轮廓时的装夹与找正。

工件装夹：选用机用虎钳装夹工件，找正机用虎钳固定钳口与工作台 *X* 轴移动方向平行。在毛坯铣削完毕后，在工件下表面与机用虎钳之间放入厚度适当的平行垫块，工件装夹之前

用表检测垫块表面平面度，工件露出钳口表面不低于椭球高度 10mm，利用木锤或铜棒敲击工件，使平行垫块不能移动后，再夹紧工件。找正工件 *X* 轴、*Y* 轴零点位于工件对称中心位置。工件上表面为执行刀具长度补偿后的 *Z* 零点表面，根据椭圆大小选用合适的平底键槽铣刀（粗加工）与球头铣刀（精加工）加工椭圆外形轮廓，至达到尺寸要求。铣刀半径设为 R05，采用刀心编程，轮廓尺寸加铣刀半径 R05。

2. 参数设定

为了程序能够通用，将立体半椭球的加工编写编制成 R 参数子程序，然后通过调用子程序的方式加工某一具体的立体半椭球，有关参数题中已给定，中间参数 R01 为椭球上任意点与椭球中心点的连线在垂直平面上与 *X* 轴的夹角；R02 是连线在水平面上与 *X* 轴的夹角，如图 4-29 所示。

3. 编程思路

与 4.5 节例 1 相似，要利用椭圆方程式 $X=a\cos\beta$，$Y=b\sin\beta$ 编写，不同之处在于本例是立体的椭球，用平行于坐标平面的平面去截取椭球，得到的截面均为椭圆，不同截平面所获得的椭圆方程式为 $X=a\cos\beta$，$Y=b\sin\beta$，其长半径 *a*、短半径 *b* 是变化的，这就必须找出它们的变化规律来。如图 4-29 所示，*P* 点为半椭球上的任意一点，过 *P* 点的水平截平面所截得的椭圆轮廓如图虚线所示，在主视图上是一条直线，另两个视图上的投影如细实线椭圆（或半椭圆）所示，通过变量 R01 求得不同水平截平面所截得的椭圆轮廓（图 4-30），每一层的椭圆由变量 R01 控制，取值范围为 0°～90°，同一层椭圆轮廓的任意位置是 *K* 点，*K* 的位置由变量 R02 控制，取值范围为 0°～360°。下面是椭球程序编制的关键：

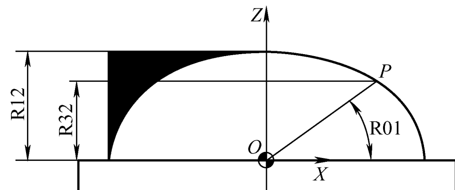


图 4-30 椭球上 *P* 点椭圆截面层

1）分层及层数的循环与控制。

2）每层的加工循环与控制。

3）各轴的坐标计算。

4）加工方向的确定。

由此可以看到，要用内外两层循环才能实现立体半椭球的程序编制，关于加工方向的确定分析：从图 4-30 中可以看出，无论是逐层向下还是逐层向上，加工余量都是不均匀的。经过粗加工，加工出半椭球的大体形状后，余量不均匀的情况会有所改善。采用逐层向下加工，开始加工的宽度余量较宽，需要较大直径的刀具；采用逐层向上加工，开始加工的深度余量较深，需要较大刃长的刀具，这就要根据椭球长、短径比来确定了。本例采用逐层向上加工的方法编写。

4. 立体半椭球参数子程序

程序如下：

```
BANTUOQIU.SPF;                              立体半椭球参数子程序名
N05 R01=0;                                  R01 层变量，从底层开始逐层向上加工
N10 KP1: R30=(R10+R05) *COS(R01);           P 点 X 坐标，R05 为平底铣刀半径
N15 R31=(R11+R05) *COS(R01);                P 点 Y 坐标，“刀心”方式编程
N20 R32=R12*SIN(R01);                       P 点 Z 坐标，若是球头铣刀，应加铣刀半径
N25 G01 Z=R32 X=R30;                        刀具走到每层的起点 P
N30 R02=0;                                  R02 为各层的角度变量
N35 KP2: R40=R10*COS(R01) * COS(R02);       K 点的 X 坐标
```

```
N40 R41=R11*COS(R01) *SIN(R01);        K 点的 Y 坐标
N45 G01 X=R40 Y=41;                    加工每一层的椭圆
N50 R02=R02+1;                         层内的角度变化按 1°增加
N55 IF R02<=360 GOTOB KP2;             内层循环结束
N55 R01=R01+0.5;                       层间的角度变化按 0.5°增加
N60 IF R01<=90 GOTOB KP2;              外层循环结束，刀具到顶部
N65 Z=IC(10);                          抬刀 10mm，“IC”表示增量
N70 RET;                               子程序结束
```

5. 调用立体半椭球参数子程序加工

如图 4-31 所示，半椭球的方程为：$x^2/50^2+y^2/25^2+z^2/35^2=1$，现调用半椭圆球参数子程序进行加工，主程序如下：

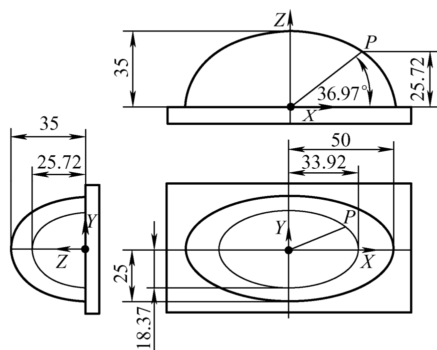


图 4-31　半椭球加工

```
TUOQIU.MPF;                            半椭球加工的主程序名
N05 R10=50 R11=25 R12=35 R05=10;       参数赋值
N10 G54 G90 G00 Z=R12+10 T1;           刀具初始位置
N15 S1000 M03 F600;
N20 G00 X=R10+R05+20 Y0;               走到工件外安全位置的起刀点
N25 G01 X=R10+R05 Z20;                 刀具接近工件准备加工
N30 BANTUOQIU;                         调用半椭球参数子程序
N20 G00 X=R10+R05+20 Y0;               回到工件外安全位置的起刀点
N35 M30;
```

点　评

以椭圆为母线的回转体椭球在车床上车削加工很容易，这是许多教科书上都能找的，也容易编程。本例中的立体半椭球用平行于坐标平面的平面去截取椭球，得到的截面均为椭圆，不同截平面所获得的椭圆方程式为 $x=a\cos\beta$，$y=b\sin\beta$，其长半径 a、短半径 b 是变化的，这就需要读者具有一定的空间想象力与空间解析几何等数学知识，如半椭球的方程为：$x^2/50^2+y^2/25^2+z^2/35^2=1$，这就是本例的难度所在。数控编程很具有代表性，许多立体方程曲面均可采用类似的编程方法，这就是本例的意义所在，应掌握的关键技术是：

1）分层及层数的循环与控制。

2）每层的加工循环与控制。

3）各轴的坐标计算。

4）加工方向的确定。

4.7 FANUC 0i-MB系统宏指令编程基础

例1：环切法加工零件轮廓

如图4-32所示，环切加工是利用已有精加工刀补程序，通过修改刀具半径补偿值的方式，控制刀具从内向外或从外向内，一层一层去除工件余量，直至完成零件的加工。

用#1、#2表示轮廓左右和上边界尺寸，编程零点在*R*30mm圆心处，加工起始点放在轮廓右上角（可以消除接刀痕迹）。

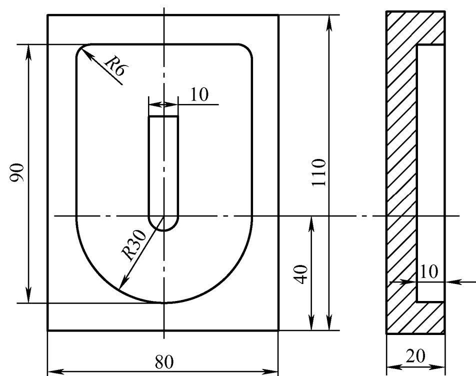


图4-32 环切法加工零件轮廓

1. 工艺分析

按“环切法”编写加工程序，需要解决三个问题：①“环切”时，刀具半径补偿值的计算；②“环切”时，起刀点（下刀点）的确定；③在程序中修改刀具半径补偿值。

对于封闭轮廓，一般选择轮廓上凸出的角作为切削起点。对于内轮廓，如没有这样的点，也可以选取圆弧与直线的相切点，以避免在轮廓上留下接刀痕。在确定切削起点后，在该点附近确定一个合适的点，来完成刀具半径补偿的建立与撤销。这个专门用于刀具半径补偿建立与撤销的点就是刀补程序的起点，一般情况下也是刀补程序的下刀点。

2. 确定环切刀具半径补偿值

刀具半径补偿值可按如下步骤进行：

1）确定刀具直径、进给步距和精加工余量。

2）确定半精加工和精加工刀补值。

3）确定环切第一刀的刀具中心相对零件轮廓的位置（第一刀刀补值）。

4）根据步距确定中间各刀刀补值。

3. 编制程序

程序如下：

```
%1000;
N05 G54 G90 G0 G17 G40;
N10 Z50 M03 S100;
N15 #4=30;                          左右边界
```

```
N20 #5=60;                              上边界
N25 #10=25;                             粗加工刀具中心相对轮廓偏移量
N30 #11=9.25;                           步距
N35 #12=6;                              精加工刀具真实半径
N40 G0 X[#4−#10−2] Y[#4−#10−2];
N45 Z5;
N50 G01 Z−10 F60;
N55 #20=2;
N60 WHILE [#20 GE 1] D01;               条件判断 1，外层循环开始
N65 WHILE [#10 GE #12] D02;             条件判断 2，内层循环开始
N70 #1=#4−#10;                          左右实际边界
N75 #2=#5−#10;                          上边实际边界
N80 G01 X[#1−2] Y[#2−2] F200;
N85 G03 X#1 Y#2 R2;                     圆弧切入到切削起点
N90 G01 X[−#1];                                         内层循环
N95 Y0;
N100 G03 X#1 R#1;                                                     外层循环
N105 G01 Y#2;
N110 G03 X[#1−2] Y[#2−2] R2;
N115 #10=#10−#11;
N120 END2;                              内循环结束
N125 #10=#12;
N130 #20=#20−1;                         计数器
N135 END1;                              条件判断 1，外层循环结束
N140 G00 Z50;
N145 M30;
```

一般而言，当选择轮廓上凸出的角作为切削起点时，刀具补偿程序应使下刀点在该角的角平分线上（45° 方向），当选取圆弧与直线的相切点或某水平/垂直直线上的点作为切削起点时，刀补程序的下刀点与切削起点的连线应与直线部分垂直。在一般的刀补程序中，为缩短空刀距离，下刀点与切削起点的距离比刀具半径略大一点，下刀时刀具与工件不发生干涉即可。但在环切刀补程序中，下刀点与切削起点的距离应大于在上一步骤中确定的最大刀具半径补偿值，以避免产生刀具干涉报警。如本例所示的零件，取 R30mm 圆弧圆心为编程零点，取 R30mm 圆弧右侧端点作为切削起点，如刀补程序仅用于精加工，下刀点取在（22，0）即可，该点至切削起点距离为 8mm。但在环切时，由于前两刀的刀具半径补偿值大于 8mm，建立刀补时，刀具实际运动方向是向左，而程序中指定的运动方向是向右，撤销刀补时与此类似，此时数控系统就会产生刀具干涉报警。因此合理的下刀点应在编程零点（0，0）。

点　评

本例采用了内外两层循环编程方式，从 N60 到 N135 为外层循环，采用 WHILE 循环结构，用于控制总的加工深度；从 N65 到 N120 为内层循环，仍采用 WHILE 循环，用于控制环切加工每圈各孔，提高了编程效率。

例 2：铣削链轮轮廓零件

如图 4-33 所示，本例题在第 3 章讲加工工艺例题时已讲了它的工艺方案，在此只编写它的数控程序。粗铣链轮时，选用“硬质合金螺旋齿”铣刀，精铣链轮时，选用“钴高速钢螺旋齿”铣刀以减小刀具的磨损，保证齿形的精度，并选 ϕ 90mm 链轮指形铣刀两把，用于链轮的粗铣与半精铣。

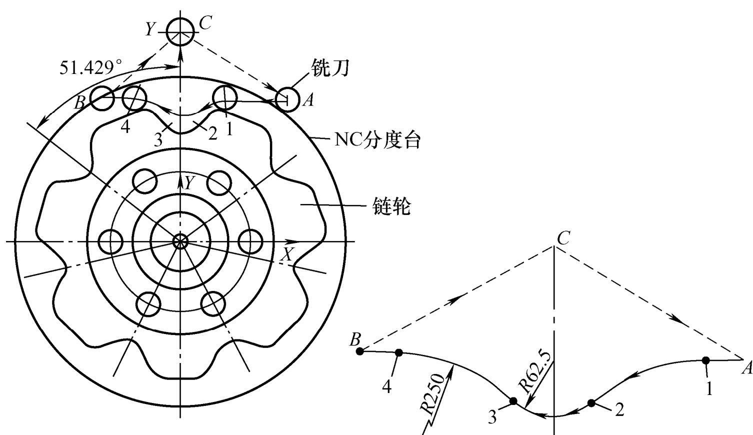


图 4-33　铣削链轮轮廓

1. 坐标点计算

由于对称关系，只需给出 *C*、*A*、1、2 四点坐标即可，它们的坐标为：

C 点（0，800），*A* 点（400，650），1 点（193.37，616.49），2 点（46.6，534.54）。

2. 编制程序

当数控铣床或加工中心有 NC 分度工作台的条件时，采用 FANUC 系统编写变量程序如下：

%O1076;	程序名
N05 G00 G90 G53 Z0;	回到换刀点
N10 M06 T2;	T2 为 ϕ50mm 钴高速钢螺旋铣刀
N15 M03 S500;	主轴正转，转速为 500r/min
N20 G54 G43 Z50 H02;	刀具长度补偿
N25 X400 Y650;	快速到 *A* 点
N30 Z−150;	快速到铣齿的深度位置
N35 #1=0;	
N40 #2=#1+1;	计数器，计算链轮的齿数
N45 #3=51.429;	每齿的夹角
N50 #4=#2*#3;	计算第 *N* 个齿的角度
N55 #5=360;	
N60 G00 B#4;	工作台回转到第 N 个齿的位置
N65 G65 P220;	调用子程序%O220
N70 1F [#4<#5] GOTO 40;	如果#4<#5，转移到 N40 程序段
N75 G00 G49 Z50;	取消刀具长度补偿，离开工件端面
N80 G40 X0 Y0 M05;	取消刀具半径补偿，主轴停转
N85 M30;	程序结束

%O220；	子程序
N05 G00 G42 X400 Y650 D02；	走到 *A* 点
N08 G01 X193.37 Y616.49 F80；	插补到 1 点
N10 G03 X46.6 Y534.54 R250；	铣到 2 点
N15 G02 X–46.6 Y534.54 R62.5；	铣到 3 点
N20 G03 X–193.37 Y616.49 R250；	铣到 4 点
N25 G01 X–340.Y620；	铣到 *B* 点
N30 G00 G40 X0 Y800；	取消刀补，回到 *C* 点
N35 M99；	子程序结束

4.8　内、外球面加工

例 1：内球面的铣削加工

加工球面零件比较常见，一般是在车床上车削加工，也比较容易，但有些球面零件又不宜在车床上加工，如核电产品上的封头，技术要求也很高，需要在数控铣镗床上加工，如图 4-34 所示的内球面，因此，需要研究内、外球面零件的铣削加工程序问题。

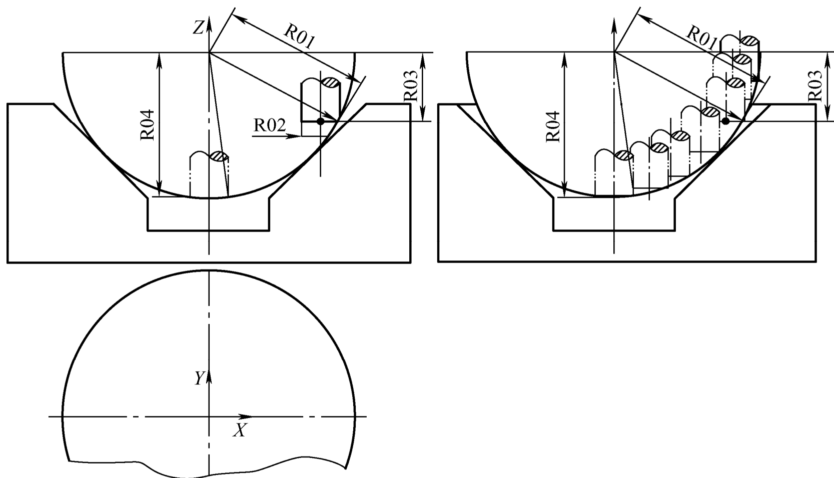


图 4-34　内球面零件的粗加工

1. 内球面的粗加工工艺方案设计

内球面粗加工所使用的方法为“自上而下、高度方向等步长向下”进行的分层式粗加工，逐层去除余量，如图 4-32 所示。假设待加工的毛坯为一实心体，粗加工方式为：使用平底铣刀（或大直径铣刀盘），每次从中心垂直下刀，向 *X* 负方向走第一段距离后顺时针走整圆，因为是粗加工，故全部采用逆铣，走完最后外圈后抬刀返回中心，进给至下一层继续，直至到达预定深度。

2. R 参数的设置

R01——内球面的圆弧半径。

R02——铣刀半径。

R03——Z 坐标值设为自变量，半球面 Z=0。

R04——内球面底部深度，R04<=SQRT（R01*R01−R02*R02）。

R20——深度方向 Z 坐标每次递减量。

3. 内球面的粗加工 R 参数子程序

程序如下：

```
LEIQIUCU.SPF；                              内球面粗加工 R 参数子程序名
N05 G00 G90 X0 Y0 Z30；                     快速到达起点位置（30mm 为安全高度）
N1O R05=1.4*R02；                           步距设为刀具直径的 70%（经验值）
N15 R03=R03−R20；                           自变量 R03，赋予第 1 刀初始值（切削到材料）
N20 KK1: G01 Z=R03+2 F2000；                Z 轴以较高的进给速度接近工件
N25 G01 Z=R03 F100；                        Z 方向下降至当前加工深度
N30 R07=SQRT(R01*R01−R03*R03) −R02；        任意背吃刀量时刀具中心对应的 X 坐标值
N35 R09=R05；                               横向进给赋值
N40 KK2：IF R09>=R07 GOTOF KK3；            横向进给步距≥刀具在内腔最大回转半径时转 KK3
N45 G01 X=R09 Y0 F400；                     进给至（R09，0）点
N50 G03 X=R09 Y0 I=−R09 J0；                顺时针走整圆
N55 R09=R09+R05；                           横向进给步距值累加
H60 GOTOB KK2；                             返回 KK2 程序段，进行循环条件的判断
N65 KK3：R09=R07；                          将刀具中心在内腔的最大回转半径赋予变量 R09
N70 C01 X=R09 Y0 F400；                     进给至（R07，0）点
N75 G02 X=R09 Y0 I=R09 J0；                 顺时针走整圆
N80 G00 Z2；                                抬刀至距工件表面 2mm 处
N85 G00 X0 Y0；                             快速回到工件坐标系零点，准备下一层加工
N90 R03=R03−R20；                           Z 坐标依次递减 R20（层间距）
N95 IF R03>R04 GOTOB KK1；                  当 R03>R04 时，循环继续
N100 G00 Z40；                              抬刀至安全高度
N105 RET；                                  子程序结束并返回
```

注意事项：

1）如果所加工的球为半球，则不需要对 R04 进行赋值，只需在参数子程序 N10 段“R05=1.4*R02；”前面增加一句：“R04=−SQRT（R01*R01+R02*R02）；”。

2）实际上深度 R04 能被 R20 整除。

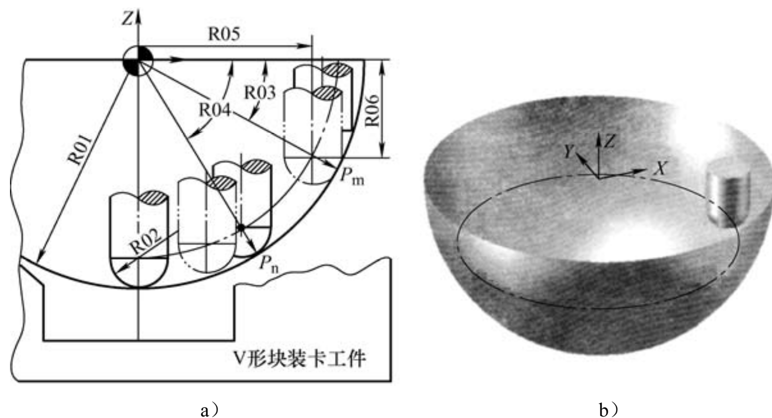
4. 内球面的精加工工艺方案设计

内球面精加工所使用的方法为“自上而下、高度方向等步长向下”进行的分层式粗加工，逐层去除余量，如图 4−33 所示。假设待加工的毛坯为一实心体，粗加工方式为：使用平底铣刀（或大直径铣刀盘），每次从中心垂直下刀，向 X 负方向走第一段距离后逆时针走整圆，因为是精加工故全部采用顺铣，走完最后外圈后抬刀返回中心，进给至下一层继续，直至到达预定深度。

为了便于进刀，内球面精加工所使用的方法一般是“自上而下、等角度水平圆弧环绕曲面精加工”，如图 4−35 所示。球头铣刀在每层都是以 G03 方式进给，由于是内凹曲面，需采用自上而下的加工顺序，每层加工时刀具的开始和结束位置重合，均指定在 OXZ 平面内的正 X 方向上。

也正是因为所加工曲面为内凹曲面，为避免过切，这里不宜采用圆弧切入和圆弧切出的进刀与退刀方式，此外，在相邻两层之间的刀具进刀，采用由 G03 圆弧插补的方式进行

层间连接。



a）　　　　　　　　　　　　b）

图 4-35　内球面零件的精加工

这里是在 *OXZ* 平面进行圆弧插补，应注意视角方向：沿着刀具轴方向，由负向正看去的方向为视角方向，*Z* 是第一轴，*X* 是第二轴，这里的刀具轴 *Y* 轴是第三轴，根据右手定则（大拇指指向为 *Z* 轴的正方向，食指指向为 *X* 轴的正方向，中指指向为 *Y* 轴的正方向），层间连接的圆弧插补方向判断如下：如果正对纸面看的话，刀具由上而下进刀，则圆弧插补方向应该为 G02，由于视角方向不符，判断的结果“取反”，即为 G03。

各 R 参数定义：

R01——内球面的圆弧半径。

R02——球头铣刀半径。

R03——（*OXZ* 平面）角度设为自变量，若为标准半球面，赋其初始值为 0。

R04——球面终止角度，R4≤90°。

R20——角度每次递增量（绝对值）。

5. 内球面的精加工参数子程序

程序如下：

```
LEIQIUJIN.SPF;                          内球面精加工参数子程序名
N05 G00 G90 X0 Y0 Z30;                  快速到达起点位置（30mm 为安全高度）
N10 R12=R01−R02;                        计算球心与刀心连线距离（常量）
N15 R05=R12*COS(R03);                   初始点刀尖的 X 坐标值（绝对值）
N20 R06=−R12*SIN(R03);                  初始点刀尖的 Z 坐标值
N25 G00 X=R04−2.0;                      X 方向以 G00 移动至距初始点 2mm 处
N30 Z=R06−R02+2.0;                      Z 轴快速接近工件，距初始点刀尖 2mm 处
N35 G01 Z=R06−R02 F400;                 Z 向进给，下降至初始点
N40 X=R05 F600;                         X 方向 G01 进给至初始点
N45 G17 G03 X=R05 Y0 I=−R05 J0;         G17 平面内（当前层）沿球面 G03 走整圆
N50 KK1：R07=R12*COS(R03+R20);          下一层刀尖的 X 坐标值
N55 R08=R12*SIN(R03+R20) −R02;          下一层刀尖的 Z 坐标值（绝对值）
N60 G18 G03 X=R07 Z=R08 CR=R12 F400;    G18 平面内当前层以 G03 过渡至下一层
N65 G17 G03 X=R07 Y0 I=R07 J0 F800;     G17 平面内（当前层）沿球面 G03 走整圆
N70 R03=R03+R20;                        角度 R03 每次递增 R20
```

```
N75 IF R03<R04 GOTOB KK1；        如果 R03<R04，跳转到 KK1 程序段，循环继续
N80 G00 Z30；                     抬刀至安全高度
N85 RET；                         参数子程序结束并返回
```

注意：

1）如果 R03=0°，R04=90°，即对应于一个完整（标准）的半球面。

2）应确保球面终止角度 R04 能被 R20 整除。

例 2：外球面的铣削加工

试编制图 4-36 所示外球面的铣削加工工艺与数控程序。

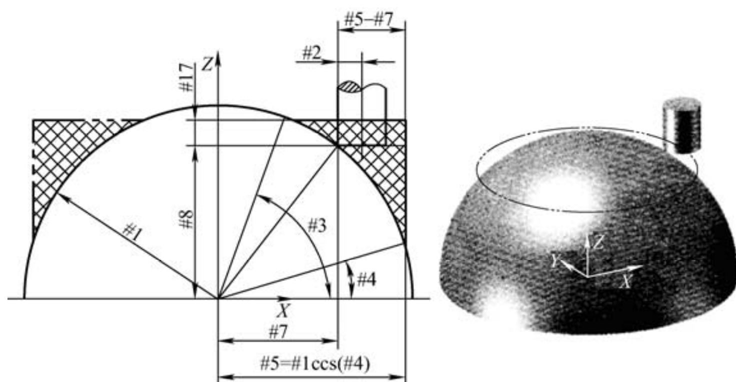


图 4-36　外球面零件的加工

1. 加工原理

无论需要加工的外球面是一个完整（标准）的半球面还是半球面的一部分，均假设待加工的毛坯为一圆柱体，图中阴影部分即为使用平底铣刀进行粗加工时需要切除的部分，以自上而下的等高方式逐层去除加工余量，每层以 G02 方式（顺铣）铣削加工。在每层加工时，如果被去除部分的宽度大于刀具直径，则还需以 G02 方式由外至内多次铣削加工。

为了便于描述，每层加工时刀具的开始和结束位置均指定在 *OXZ* 平面内的+*Y* 方向，外球面的粗加工通常使用平底铣刀在 *Z* 方向进行分层铣削，即使用平底铣刀由上而下（或由下而上）以等高方式逐层切削，每层采用 G02/G03 圆弧插补铣削。编程时为了保证加工余量的均衡，在 *Z* 方向进行分段，以 *Z* 等于某个值为一个步距，并把 *Z* 作为自变量，圆弧半径作为 *Z* 的函数。

2. 工艺分析

进给轨迹的处理：用立铣刀铣削曲面是刀尖或部分刀沿完成的，当刀尖沿圆弧运动时，其刀具中心运动轨迹是与零件轮廓相似的圆弧，但两个圆弧的圆心与半径均不相同，如图 4-37a 所示。

对球头铣刀加工，曲面加工是球头铣刀的切削刃完成的，其刀具中心是球面的同心球面，半径相差一个刀具半径，如图 4-37b 所示。

（1）刀具选择　球面加工使用的刀具：粗加工可以使用键槽铣刀或立铣刀，也可以使用球头铣刀，精加工应使用球头铣刀。由于采用三轴联动，刀具轴线不可能随时与球面各点的

法线一致，因此是近似加工，存在原理误差。

（2）进给路线　球面加工的进给路线一般是一系列水平面截球面所形成的同心圆。在进给控制上有从上向下进给和从下向上进给两种，一般应从下向上进给来完成加工，此时主要利用铣刀侧刃铣削，表面质量较好，端刃磨损较小，同时切削力将刀具向“欠切”方向推，有利于控制加工尺寸。

（3）进刀点的计算与控制　先根据允许的加工误差和表面粗糙度要求，确定合理的 Z 向进给量，再根据给定加工深度 Z，计算加工圆的半径，即 $X=\mathrm{SQRT}(R^2-Z^2)$，此方法进给次数较多。另一种方法是先根据允许的加工误差和表面粗糙度，确定两相邻进刀点相对球心的角度增量，再根据角度计算进刀点的 R 值和 Z 值，即 $Z=R\sin\theta$，$X=R\cos\theta$，如图 4-37c 所示。

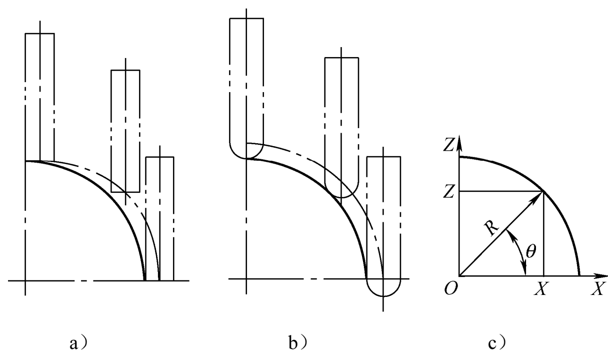


图 4-37　外球面加工进刀点的计算与控制

3. 编制程序

（1）根据宏程序格式要求设定参数（用平头刀进行粗加工外球面）

#1=（A）—外球面的圆弧半径。

#2=（B）—平底铣刀半径。

#3=（C）—球面起始角度，#3≤90°。

#4=X（1）—球面终止角度，#4≥0°。

#17=（Q）—Z 坐标每次递减量（即 Z 方向进刀的层间距）。

（2）宏程序

程序如下：

```
O0674;                              程序号
N05 G00 G90 X0 Y0 Z[#1+30.0];       快速移动至球面中心上方安全高度
N10 #18=#1*COS[#4];                 终止高度上接触点的X坐标值（即工件毛坯半径）
N15 #19=1.6*#2;                     步距设为刀具直径的80%（经验值）
N20 #20=#1*SIN[#3];                 起始高度上刀尖的Z坐标值
N25 #21=#1*SIN[#4];                 终止高度上刀尖的Z坐标值
N30 WHILE[#20 GT #21] D0 1;         如果#20>#21，执行循环体1
N35 G01 X[#18+#2+1.0] Y0 F1000;     快速移动到毛坯外侧
N40 Z[#20+1.0];                     快速移动到Z轴起始高度上方1mm处
N45 #20=#120–#17;                   本次循环所对应加工深度的Z坐标
N50 G01 Z[#20] F150;                以切削速度进给到本次循环所对应加工深度
N55 #22=SQRT[#1*#1–#20*#20];        计算在本次循环背吃刀量下的X坐标
```

```
N60 #23=#18−#22;                           本次循环背吃刀量下，X方向被去除材料的宽度
N65 #24=FIX[#23/#19];                      被去除宽度除以步距并取整
N70 WHILE[#24 GE 0] D0 2;                  当#2>=0（即还未走到最后一圈）时执行循环体 2
N75 #25=#22+#24*#19+#2;                    计算X方向坐标值
N80 G01 X#25 Y0;                           以 G01 移动至圆弧插补起始点
N85 G02 X#25 Y0 I−#25 J0;                  圆弧插补铣削
N90 #24=#24−1.0;                           自变量#24（每层走刀圈数）递减
N95 END 2;                                 循环体 2 结束
N100 G00 Z[#1+30.0];                       Z方向快速退刀
N105 END 1`;                               循环体 1 结束
NI10 M99;                                  宏程序结束
```

加工一个外球面，球面半径为 200mm，平头刀直径为 30mm，外球面起始角度为 90°，终止角为 0°，*Z* 轴每层递减量为 1mm，其程序如下：

```
%O5403;
N05 G54 G90 G17 G80 G40;                   程序初始化
N10 T01 M06;                               选择 1 号刀具
N15 M03 S500;
N20 G00 G90 X0 Y0;
N25 G01 G43 H01 Z230.0 F2500;              刀具长度补偿，安全高度应大于外球面半径
N30 G65 P0674 A20.0 B3.0 C90.0 I0 Q1.0;    宏程序调用，并进行局部变量的指定
N35 G91 G28 Z0;                            Z轴返回参考点（换刀点）
N40 X0 Y0 M19;                             X轴、Y轴返回参考点，主轴准停
N45 M30;                                   程序结束
```

点　评

本例采用了无摆动轴的三轴联动方式及内、外两层循环编程方式，存在原理误差。从 N30 到 N105 为外层循环，采用 WHILE … DO 循环，用于控制球体分层加工；从 N70 到 N95 为内层循环，仍采用 WHILE … DO 循环，用于控制每层球体加工。由于刀具轴线不可随时与球面轮廓线切线垂直，因此是近似加工，否则需要 1～3 个摆动轴才能实现无原理误差的加工。

4.9　孔系加工

相关知识点

1．直线均布孔系循环

（1）指令格式

HOLES1（SPCA，SPCO，STA1，FDIS，DBH，NUM）；

直线均布孔系循环用于加工直线均布孔，在加工时首先要用 MCALL 指令以模态方式调用单个孔加工循环，再根据孔的分布情况设定直线均布孔循环的各项参数，最后用 MCALL 取消循环。循环参数可以设置为变量，通过调用循环及进行简单的变量运算，可加工矩形均布或菱形均布的网格孔，如图 4-38a 所示的菱形均布网格孔系的加工。HOLES1 用于计算孔

的坐标，本身不钻孔，孔加工循环采用 CYCLE81。

（2）参数说明

SPCA：参考点的 X 坐标（绝对值），射线的起点 X 坐标。

SPCO：参考点的 Y 坐标（绝对值），射线的起点 Y 坐标。

STA1：孔中心所在直线与 X 坐标的（射线的）夹角，取值范围为−180°～180°。

FDIS：第一个孔中心到参考点的距离（无符号数）。

DBH：相邻孔孔距（无符号数）。

NUM：孔的数量。

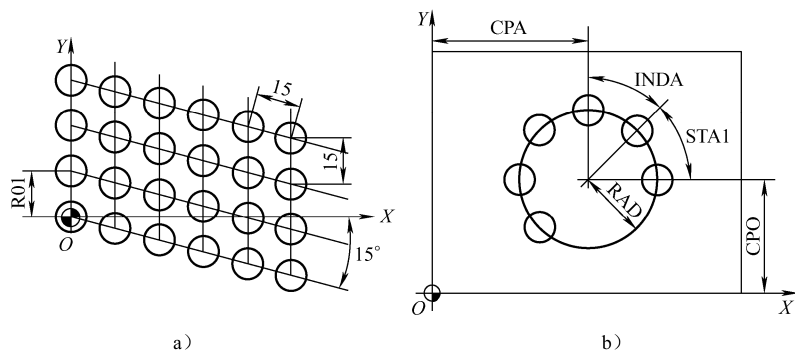


图 4-38　孔系循环加工

a）直线均布孔系　b）圆周均布孔系

2. 圆周均布孔系循环

（1）指令格式

HOLES2（CPA，CPO，RAD，STA1，INDA，NUM）;

采用圆周均布孔系循环与孔加工固定循环（CYCLE8）联合方式，加工沿圆周均布的一圈孔会更加方便。将循环参数设置为变量，加工圆周均布孔系，如图 4-38b 所示圆周均布孔系的加工。

（2）参数说明

CPA：圆中心点的 X 坐标（绝对值）。

CPO：圆中心点的 Y 坐标（绝对值）。

RAD：圆周半径（无符号数）。

STA1：初始角，取值范围为−180°～180°。

INDA：分度角度。

NUM：孔的个数。

3. 矩阵均布的孔

矩阵均布的孔无单独编程指令，可通过本节的例子说明编程方法。

例 1：平行孔系的加工

图 4-39 所示零件的毛坯尺寸为 100mm×100mm×50mm，材料为 45 钢，要求加工上表面、凸台及各孔，编制数控加工程序。

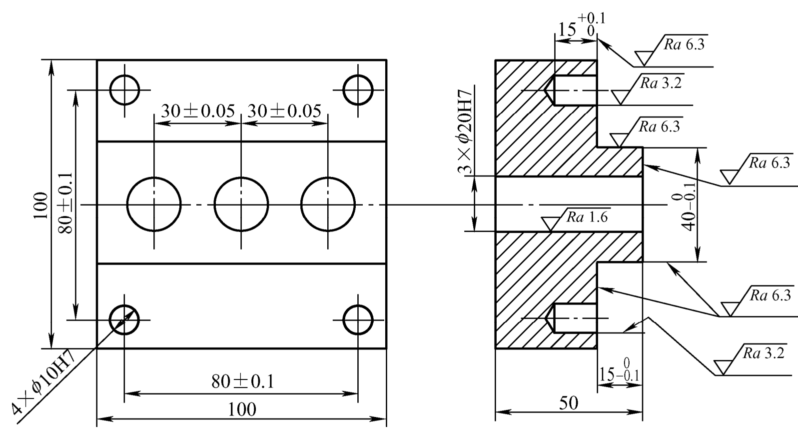


图 4-39 平行孔系的加工

1. 工艺分析

1）图 4-37 所示的零件主要是加工各孔，本着“先面后孔”的加工原则，以工件底面为基准，可以先在普通铣床上加工出底面及 100mm×100mm 的正方形到尺寸，上表面按 50mm 铣到尺寸，表面粗糙度值为 *Ra*3.2～6.3μm 即可。

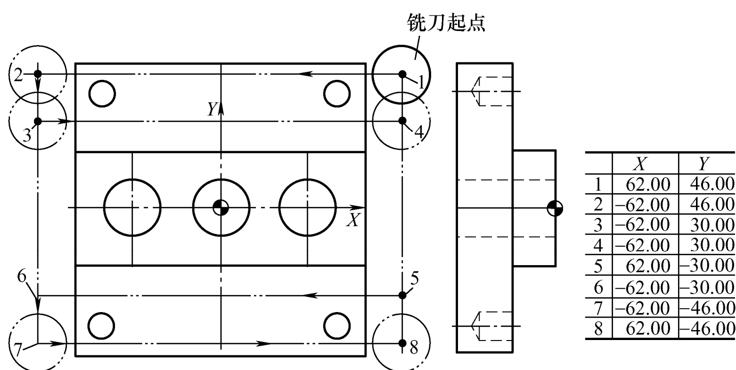
2）工件装夹。选用机用虎钳装夹工件，找正机用虎钳固定钳口与工作台 *X* 轴移动方向平行。毛坯铣削完毕后，在工件下表面与机用虎钳之间放入厚度适当的平行垫块，由于 3 个 ϕ20Hmm 的孔是通孔，为了便于刀具出刀，工件下方要悬空，悬空高度在 20mm 左右。在装夹工件之前，要用表检测一下“垫块”表面的平面度，工件露出钳口表面不少于 20mm，利用木锤或铜棒敲击工件，使平行垫块不能移动后，再夹紧工件。找正工件 *X* 轴、*Y* 轴零点位于工件对称中心位置。工件上表面为执行刀具长度补偿后的 *Z* 零点表面。

3）平行孔系加工的刀具与切削参数见表 4-9。

表 4-9 平行孔系加工的刀具与切削参数

工 步	工 步 内 容	刀 号	刀 具 规 格	主轴转速/（r/min）	进给速度/（mm/min）
1	台阶粗加工	T01	ϕ20mm 粗齿立铣刀	800	100
2	台阶精加工	T02	ϕ20mm 细齿立铣刀	1500	60
3	打中心孔	T03	ϕ5mm 中心钻	1000	200
4	钻孔	T04	ϕ9.8mm 钻头	600	100
5	钻孔	T05	ϕ19.8mm 钻头	600	100
6	铰孔	T06	ϕ10H7mm 铰刀	500	50
7	铰孔	T07	ϕ20H7mm 铰刀	500	50

4）加工台阶选用 ϕ20mm 的立铣刀，进给路线如图 4-40 所示。



	X	Y
1	62.00	46.00
2	−62.00	46.00
3	−62.00	30.00
4	−62.00	30.00
5	62.00	−30.00
6	−62.00	−30.00
7	−62.00	−46.00
8	62.00	−46.00

图 4-40　加工台阶的进给路线

2. 编制程序

程序如下：

```
PINGXING.MPF;                          主程序
N05 M06 T01;                           选用 φ20mm 的粗齿立铣刀，粗铣台阶面
N10 G90 G54 G00 Z50 D01 S800 M03;
N15 G00 X62 Y46;                       铣刀起点
N20 G00 Z−14.8;                        粗铣台阶面到 14.8mm，精加工留量 0.2mm
N25 G01 X−62 Y46 F100;                 到第 2 点
N30 G01 Y30;                           到第 3 点
N35 G01 X62;                           到第 4 点
N40 G00 Y−30;                          到第 5 点
N45 G01 X−62;                          到第 6 点
N50 G01 Y−46;                          到第 7 点
N55 G01 X62;                           到第 8 点，粗铣台阶结束
N60 G00 Z50 M05;
N105 M06 T02;                          选用 φ20mm 的细齿立铣刀，精铣台阶面
N110 G90 G00 Z50 D02 S800 M03;
N115 G00 X62 Y46;                      铣刀起点
N120 G00 Z−15;                         精铣台阶面到 15mm
N125 G01 X−62 Y46 F100;                到第 2 点
N130 G01 Y30;                          到第 3 点
N135 G01 X62;                          到第 4 点
N140 G00 Y−30;                         到第 5 点
N145 G01 X−62;                         到第 6 点
N150 G01 Y−46;                         到第 7 点
N155 G01 X62;                          到第 8 点，精铣台阶结束
N160 G00 Z50 M05;
N205 M06 T03;                          选用 φ5mm 中心钻
N210 Z50 D03;
N215 S1000 M03 F200;                   打中心孔
N220 MCALL CYCLE81(2,0,2,3,);          钻 3×φ20H7mm 孔的中心孔
N225 X30 Y0;
N230 X0 Y0;
N235 X−30 Y0;
N240 MCALL;
N245 MCALL CYCLE81(2,0, −15,3,);       钻 4 个 φ10H7mm 孔的中心孔
```

```
N250 X40 Y40;
N255 X−40 Y40;
N260 X−40 Y−40;
N265 X40 Y−40;
N270 MCALL;
N275 G00 Z50 M05;
N305 M06 T04;                           更换 φ9.8mm 钻头
N210 Z50 D04;
N215 S1000 M03 F200;
N245 MCALL CYCLE82(2,0, −15, −30, ,1);  钻 4 个 φ10H7mm 孔的中心孔
N250 X40 Y40;
N255 X−40 Y40;
N260 X−40 Y−40;
N265 X40 Y−40;
N270 MCALL;
N275 G00 Z50 M05;
N305 M06 T04;                           更换 φ19.8mm 钻头
N310 Z50 D03;
N315 S1000 M03 F200;                    打中心孔
N320 MCALL CYCLE81(2,0,2, −63,);        钻 3×φ20H7mm 孔的中心孔，钻尖完全钻出工件
N325 X30 Y0;
N330 X0 Y0;
N335 X−30 Y0;
N340 MCALL;
N345 G00 Z50 M05;
N350 M06 T06;                           更换 φ10H7mm 铰刀
N355 Z50 D06;
N360 S500 M03 F50;
N365 MCALL CYCLE85(   2,   0,    2,11.5,    ,    1,  50, 1.3*50);
          与 CYCLE85(RTP,RFP,SDIS, DP,DPR,DTB,FFR, RFF)各项对应，逗号不能少
N370 X40 Y40;                           铰 4 个 φ10H7mm 孔
N375 X−40 Y40;                          铰孔深度=15mm−5mm/tan59° =11.5mm
N380 X−40 Y−40;
N385 X40 Y−40;
N390 MCALL;
N395 G00 Z50 M05;
N400 M06 T07;                           更换 φ20H7mm 铰刀
N410 Z50 D07;
N415 S500 M03 F50;                      铰 3 个 φ30H7mm 孔
N420 MCALL CYCLE85(   2,   0,    2,  50,     ,    1,  50,1.3×50);
          与 CYCLE85(RTP,RFP,SDIS, DP,DPR,DTB,FFR,RFF)各项对应，逗号不能少
N425 X30 Y0;                            铰 3 个 φ20H7mm 孔
N430 X0 Y0;
N435 X−30 Y0;
N440 MCALL;
N475 G00 Z50 M05;
N480 M30;
```

例 2：环形阵列孔系的加工

如图 4-41 所示，各孔呈环形阵列均布，孔径均为 ϕ10mm，孔深 40mm，编写加工编程。

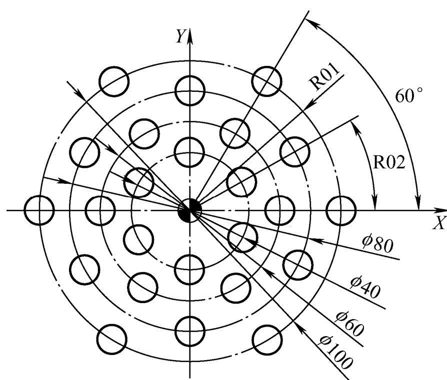


图 4-41　环形阵列均布孔

1．编程思路

根据零件特点及编程方便程度，工件坐标系零点设定在工件的几何中心，循环指令中的各项参数如下：

圆周孔均布中心点的横坐标 CPA=0；圆周孔均布中心点的纵坐标 CPO=0；根据四圈孔的分布情况，将最外圈孔的圆周均布半径 RAD 设为变量 R01，R01 的初值为 50，终值为 20，每圈依次递减量为 10；将每圈孔的起始角度 STA1 设为变量 R02，最外圈 R02（R02 的初值）为 0°，最外圈 R02（终值）为 90°，递增量为 30°，每圈孔的增量角 INDA=60°，孔数 NUM=6。由于孔深/孔径=40/10=4<5，因此按浅孔加工。

2．加工程序

程序如下：

```
YUANZHOU.MPF；                          圆周均布的各孔加工主程序
N05 G54 G90 G00 X0 Y0 Z50；             刀具走到工件中心上方
N10 M03 S600 F100；
N15 R01=50；                            孔的圆周均布半径 RAD 设为变量 R01
N20 R02=0；                             圆周均布孔起始角 STA1 设为变量 R02
N25 MCALL；
N30 CYCLE81 (  10,   0,    3,    , −40)；        模态调用单个孔加工循环，
与“CYCLE81(RTP,RFP,SDIS,DP,DPR)；”各项对应，逗号不能少
N35 MA1：HOLES2 (   0,    0,  R01, R02,    60,     6)；   调用圆周均布循环，
        与“HOLES2(CPA,CPO,RAD,STA1,INDA,NUM)；”各项对应
N40 R01=R01−10；                        RAD 每次递减 10
N45 R02=R02+30；                        STA1 每次递增 30°
N50 IF R01>=20 GOTOB MA1；              条件判别，RAD 值小于 20 时，循环结束
N55 MCALL；                             取消孔加工循环的模态调用
N60 G00 Z50 M05；                       刀具抬到安全位置
N65 M30；                               程序结束
```

就单孔加工而言，其加工有一次钻进和间歇钻进之分，为使用方便，编写的程序应能完成此两种加工。加工图 4-42a 所示工件上的各孔，编程零点设定在分布圆中心，Z 轴零点设定在工件上表面。如图 4-40b 所示，在以圆心（$X0$，$Y0$）为圆周基准点，半径为 r 的圆周上，始角为 α，加工 n 个等分孔，为方便采用 FANUC 系统的读者，用“宏程序”编程。

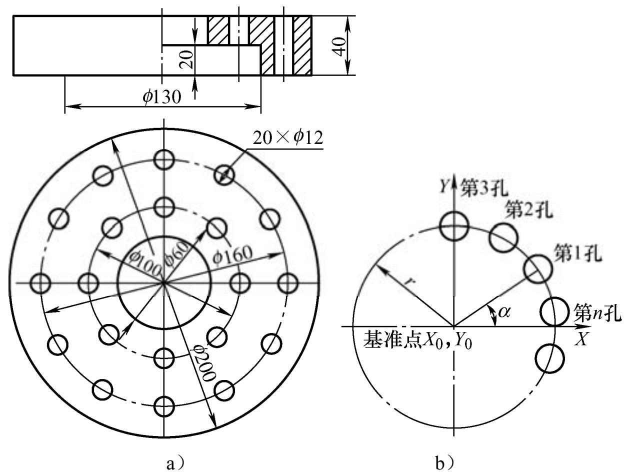


图 4-42　环形阵列孔系加工

3. 变量设定

#500，#501：基准点的坐标（X，Y）。

#502：半径（r）。

#503：起始角（α）。

#504：孔的总数。

#100：钻第 i 个孔（i）。

#101：钻孔计数器。

#102：第 i 个孔的角度（θ_i）。

#103、#104、#105：第 i 个孔的坐标值（X_i，Y_i，Z_i）。

4. 用户宏程序

程序如下：

```
O9010;
N05 G65 H01 P#100 Q0;                      i=0，表示第 i 个孔
N10 G65 H01 P#101 Q#504;                   ie=n，孔的总数
N15 G65 H04 P#102 Q#100 R360000;  }
N20 G65 H05 P#102 Q#102 R#504;    }  θi = α + 360°i / n
N25 G65 H02 P#102 Q#503 R#102;    }
N30 G65 H32 P#103 Q#502 R#102;    }
N35 G65 H02 P#103 Q#500 R#103;    }  X = X + r cos θi
N40 G65 H31 P#104 Q#502 R#102;    }
N45 G65 H02 P#104 Q#501 R#104;    }  Y = Y + r sin θi
N50 G90 G00 X#103 Y#104;                   第 i 个孔定位
N55 G73 P#103 P#104 P#105 R3 Q8 F60;       G73 高速“深孔钻削”循环
N60 G65 H01 P#100 Q#100 R1;                i=i+1
N65 G65 H84 P200 Q#100 R#101;              i<ie时，转移到 N200 程序段
N70 M99;                                   用户宏程序主体结束
```

注释中的公式：$\theta_i=\alpha+\dfrac{360^{\circ}i}{n}$；$X=X+r\cos\theta_i$；$Y=Y+r\sin\theta_i$

5. 环形阵列孔系加工主程序

程序如下：

```
%O0010;                              调出用户宏程序主程序
N5 G65 H01 P#500 Q0;                 X=0
N10 G65 H01 P#501 Q0;                Y=0
N15 G65 H01 P#503 Q20000;            α=0°
N20 G92 X0 Y0 Z0;                    设定坐标系
N25 G65 H01 P#502 Q100000;           R=50mm，先加工内圈的 8 个孔
N30 G65 H01 P#504 Q12;               n=8
N35 M98 P9010;                       调出用户宏程序
N40 G00 X0 Y0;                       回原点
N45 G65 H01 P#502 Q100000;           R=80mm，再加工外圈的 12 个孔
N50 G65 H01 P#504 Q12;               n=12
N55 M98 P9010;                       调出用户宏程序
N60 G00 X0 Y0;                       回原点
N65 M30;                             程序结束
```

该例为环形阵列孔系的加工，先后采用了两种方法编程，一是用 SINUMERIK 系统的 HOLES2 指令；二是为了方便采用 FANUC 系统的读者，用“宏程序”编程，其中：

“N250 G73 P#103 P#104 P#105 R3 Q8 F60 K_;”可以换成“G#120;”，用#120 代表循环指令，当#120=73 时，为高速深孔钻削循环；当#120=81 时，为钻浅孔；当#120=83 时，为深孔循环等，并在主程序调时给定相应参数即可。

前面两例均为 ϕ20～ϕ50mm 的中小孔的加工，例中孔的轴线与坐标平面垂直，无论是钻孔、扩孔还是铣、镗孔，加工起来很方便。若是斜孔加工就不一样了，特别是尺寸较大的斜孔，如 ϕ50mm 以上的斜孔，加工就更困难了，本节例题 4 就是 ϕ1000*mm* 左右的大直径斜孔铣削加工。

例 3：矩阵均布孔系的加工

如图 4-43 所示，各孔呈矩阵均布，孔径均为ϕ8mm，深度为 80mm，通孔，编写加工编程。

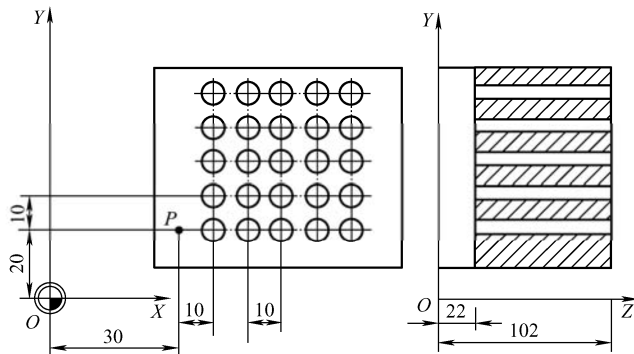


图 4-43　矩阵均布孔系加工

1. 参数设定

由于呈矩阵均布的孔无单独编程指令，先设定参数，再编写一个通用的参数程序。

1）DEF：DEF 意思是定义，定义后面的变量类型。

2）REAL：实型变量；INT：整数变量。

3）HNUM、LNUM 分别代表行数、列数，HJ、LJ 分别代表行距、列距，且均为正整数。

SPCA、SPCO 分别代表矩阵孔起始位置的 *X*、*Y* 坐标，DBH、FDIS 分别代表射线夹角、第一孔距离（某一射线上，距起点最近的孔为第一孔，该孔中心到起点的距离为第一孔距离），

且均为实数。

4）钻削循环 CYCLE83。指令格式：

CYCLE83 (RTP, RFP, SDIS, DP, DPR, FDEP, FDPR, DAM, DTB, DTS, FRF, VARI)；

其中：

RTP：返回平面（绝对值）。

RFP：参考平面（绝对值）。

SDIS：安全距离（无符号数）。

DP：最终钻削深度（绝对值）。

DPR：相对参考平面的钻削深度（无符号数）。

FDEP：第一次钻削深度（绝对值）。

FDPR：相对于参考平面的第一次钻削深度（无符号数）。

DAM：其余每次钻削深度（无符号数）。

DTB：孔底暂停时间（断屑）。

DTS：在起始点和排屑点的停留时间。

FRF：第一次钻削深度的进给速度系数（无符号数），取值范围为 0.001～1。

VARI：加工方式，1—排屑，0—断屑。

2. 主程序

程序如下：

```
JUZHNKONG.MP；                              矩阵孔主程序
N05 DEF REAL REP DP RTP SDIS；              定义变量
N10 DEF REAL SPCA SPCO；                    矩阵孔的起始位置
N15 DEF REAL STA1 DBH FDIS；                射线夹角、孔距、第一孔距离
N20 DEF INT HNUM LNUM ZAEL；                行数、列数、已加工行数
N25 DEF INT HJ LJ；                         行距、列距
N30 G54 G90 G00 X100 Y 100 Z50；
N35 RTP=105 RFP=102 SDIS=3 DP=22；          定义变量并赋值
N40 FDPR=20 DAM=10 DTB=0.5 DTS=1 FRF=0.9 VARI=1；
                                            参数赋值
N45 HJ=10 LJ=10；                           行间距、列间距
N50 STA1=0 DBH=10 FDIS=10；                 夹角为 0°，孔距为 10mm，第一孔距离为 10mm
N55 SPCA=30 SPCO=20；                       矩阵孔的起始位置 P
N60 ZAEL=0；                                计数器
N65 HNUM=5 LNUM=5；                         用于计算行数
N70 M03 S600 F100；
N75 JZK；                                   调用子程序
N80 M30
```

3. 参数通用子程序

程序如下：

```
JZK.SPF；                                   矩阵孔子程序
N05 G17 G00 X=SPCA+10 Y=SPCO；
N10 MCALL；
N15 CYCLE83(RTP,RFP,SDIS,DP,DPR,FDEP,FDPR,DAM,DTB,DTS,FRF,VARI)；
N20 MARKE1: HOLES1(SPCA, SPCO, STA1, FDIS, LJ, LNUM)；
```

```
N25 SPCO=SPCO+HJ;                      计算下行的位置
N30 ZAEL=ZAEL+1;                       计算加工行数
N35 IF ZAEL<HNUM GOTOB MARKE1;         判断加工的行数是否到总行数
N40 MCALL;
N45 G90 G00 X=SPCA−10 Y=SPCO Z105;
N50 M17;
```

相关知识点

在机械加工中，常会遇到与机床主轴不垂直的空间大斜孔系的铣削加工，如图 4−44 所示。在具有三轴联动的数控镗铣床上，采用万向角度铣头改变机床主轴方向，使孔轴线与铣刀轴线一致，运用空间几何建立各加工变量之间的数学模型，实现空间斜孔铣削加工数控程序参数化。结果表明工件只需一次装夹，赋予相应变量值，就可完成孔系的加工，加工精度高，省工省力，可推广到类似空间斜面、斜槽的加工。

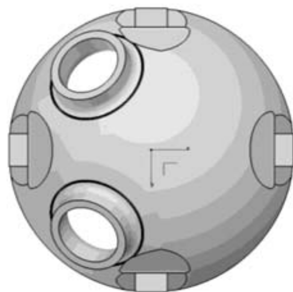


图 4−44　空间大斜孔系（模型）

例 4：大直径斜孔的加工

图 4−45 所示为 60MW 燃气轮机中压缸体，上面分布了 4 个 ϕ1194mm/ϕ990.6mm 深 200mm 的斜孔，材质为 ZG15Cr2Mo1，毛坯为铸钢件，4 个斜孔已铸出毛坯孔，外球表面为非加工表面，试制订工艺方案并编制程序。

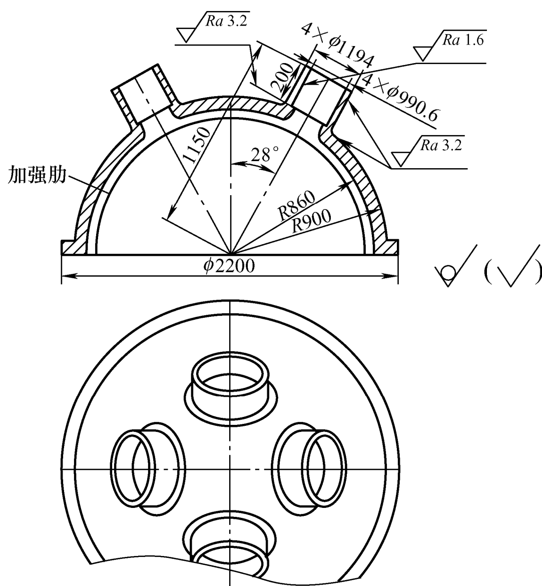


图 4−45　60MW 燃气轮机中压缸体

1．工艺方案设计

60MW 燃气轮机中压缸体零件主要是在外球面上加工 4 个 ϕ1194mm/ϕ990.6mm 深 200mm 的斜孔，所要加工的空间斜孔与机床主轴不垂直，而且孔的直径很大，“钻—扩—铰”的方案已不能满足加工要求，以往针对这类情况，通常的方法是将工件倾斜一定角度，使所加工的

孔轴线与机床主轴一致，这就是我们通常的“摆活”方式。如图 4-46 所示，由于孔径在 ϕ1000mm 左右，可采用镗床镗孔的方式，也可采用铣床铣孔的方法，两种方法对比分析如下：

（1）镗孔方案　若采用图 4-46a 所示的在卧式（落地）镗床上镗孔方案，机床主轴呈水平状态，工件要倾斜 62°，所要加工的孔轴线才能到水平位置，这时，工件下方所垫方箱的高度按下式计算

$$H=（1100mm+860mm）\sin62° \approx 1730mm$$

而且，气缸棱边着地，气缸所受的加工力与工作台平行，因此，装夹稳固性极差，致使背吃刀量小，效率低，而且因重心过高极易造成倾翻等安全事故。

（2）铣孔方案　图 4-46b 所示的加工方案是在 4.8m×12.8m 龙门铣床上来完成的，机床主轴呈垂直状态，工件要倾斜 28°，所要加工的孔轴线才能到水平位置，这时，工件下方所垫方箱的高度按下式计算

$$H=（1100mm+860mm）\sin29° \approx 920mm$$

这时，下垫高度减少了近一半，而工件上受到的加工力与工作台垂直，使工件的装夹稳固性大为提高，加工效率也成倍提高。具体方法为：在龙门铣床上，机床主轴按气缸中心及其他已加工基准面，精确定位后，先用丁字刀盘刻内圆 ϕ990.6mm、外圆 ϕ1194mm 加工线，然后用玉米棒铣刀“排铣”内外圆，单边留余量 5mm，然后用丁字刀盘加工内圆 ϕ990.6mm、外圆 ϕ1194mm 至符合图样要求。

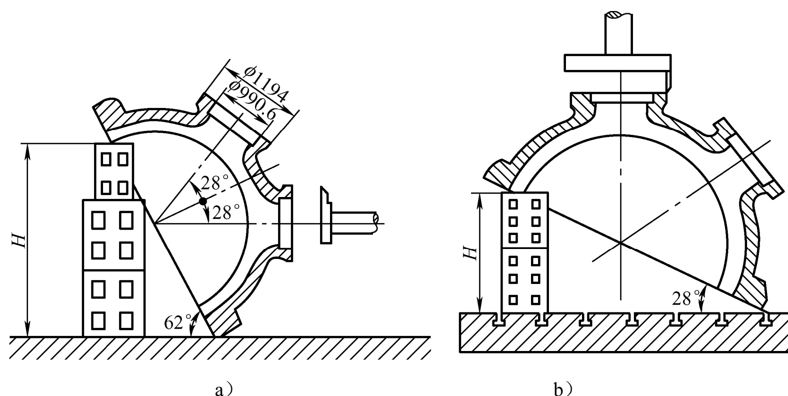


图 4-46　60MW 燃气轮机中压缸体加工方案之一

a）在卧式镗床上加工　b）在龙门铣床上加工

上述两种方案都是要将工件倾斜一定角度，才能使所加工的孔轴线与机床主轴一致，这就是我们通常所说的通过“摆活”来实现。在这两种加工方案中，每加工一个斜孔，工件均要装夹一次，不仅费工、费力，而且每装夹一次，基准也不容易重合，找正定位误差大，加工质量无法保证，所以不是较好的方法。

（3）万向角度铣头铣孔方案　利用万向角度铣头加工工件如图 4-47 所示，通过万向角度铣头改变机床主轴方向，使孔轴线与铣刀轴线一致。先在普通立式车床上加工出半球底面，并在半球底面附近先加工出“找正带”以便工件的找正与装夹，万向角度铣头铣孔只需一次装夹工件，省工、省力，定位精度高，但加工程序相对复杂，这就是“用脑力换体力、用脑力换效率、用脑力换质量”的方法。

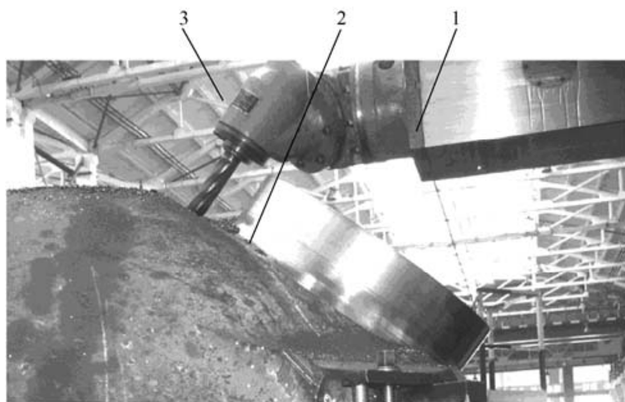


图 4-47 60MW 燃气轮机中压缸体加工方案之二

1—镗床主轴 2—工件 3—万向角度铣头

2. 参数设定

在 TK6920 落地数控镗床上，利用万向角度铣头加工工件，关键是燃气轮机缸体斜孔各参数的设定与计算，具体的参数设定如图 4-48 所示。

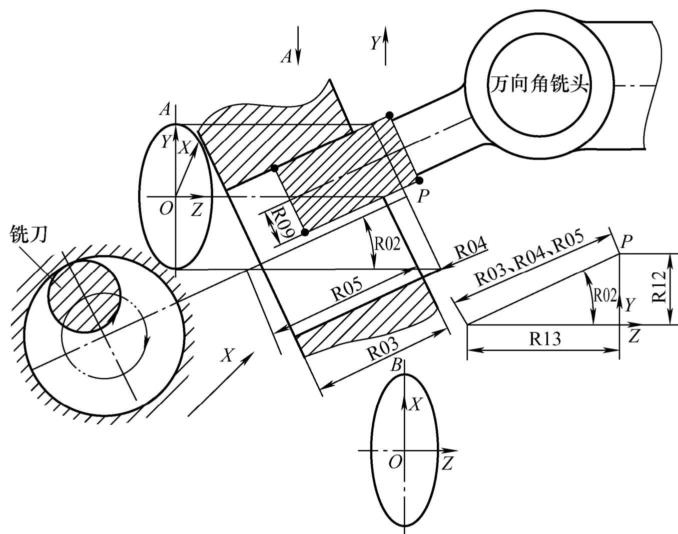


图 4-48 燃气轮机缸体斜孔参数设定

（1）直接变量

R01：加工孔半径。

R02：斜孔倾斜角度（孔轴线与水平轴线正方向的夹角）。

R03：斜孔的有效深度。

R04：刀具与斜孔底面的进刀距离。

R05：考虑出刀距离之后，孔的最终深度。

R06：斜孔顶面中心孔的 *X* 坐标，孔中心的 *X* 坐标轴设为 0。

R07：斜孔顶面中心孔的 *Y* 坐标。

R08：斜孔顶面中心孔的 *Z* 坐标。

R09：铣刀半径。

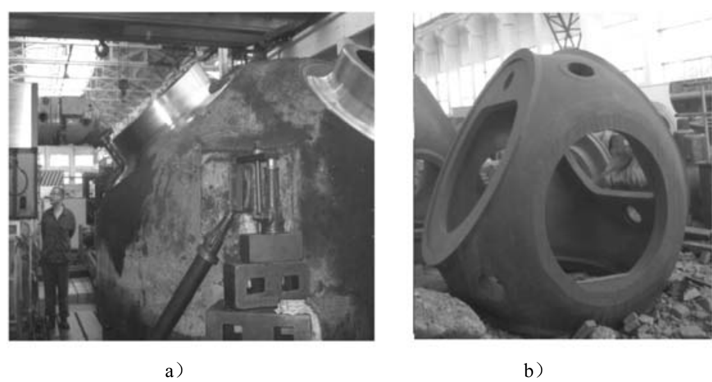
（2）操作控制参数

R46：圆周方向，圆周等分参数。

R47：深度方向，每个层次加工的深度（深度步长）。

R48：每次插补的距离，控制插补精度（角度步长）。

R49：考虑到程序同时适合斜外圆柱/斜内孔的加工，R49=±1，取+1 时为斜外圆柱的加工，取−1 时为斜内孔的加工，如图 4−49 所示。



a）　　b）

图 4−49　斜外圆柱/斜内孔的加工

a）斜外圆柱，R49=+1　b）斜内孔，R49=−1

3. 空间各参数坐标点的计算

要计算动点 *P* 的坐标，首先要求出 *OPX* 与 *PPX* 的长度。根据图 4−50 所示的几何关系有 *OPX* 的长度=R01cos46°，*PPX* 的长度= R01sin46°

图中 *OPX* 的长度与 *X* 轴平行，其长度就是动点 *P* 的 *X* 坐标，*PPX* 的长度是在 *YZ* 坐标平面，需要进行分解，即动点 *P* 的 *Y* 坐标等于 *PP′*的长度，动点 *P* 的 *Z* 坐标等于 *PPX* 的长度，因此 *P* 点的坐标计算如下

X=R01cosR46，*Y*=（R01sinR46）sinR02+R07，*Z*=（R01sinR46）cosR02+R08

这是动点 *P* 的坐标，编程时还要考虑刀具半径 R03 与孔的深度参数，缸体斜内孔空间各参数坐标点在三个坐标平面上的投影关系如图 4−50 所示。

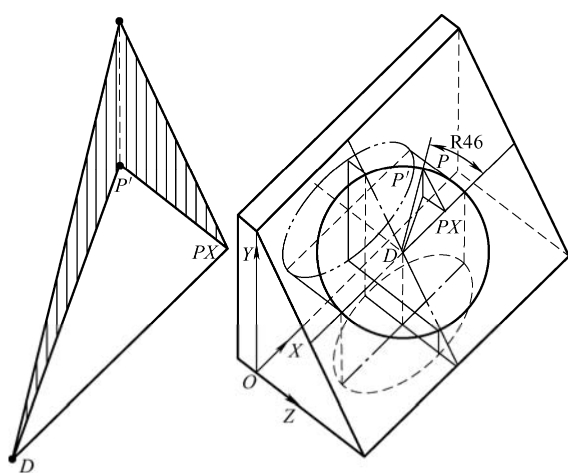


图 4−50　缸体斜内孔空间各参数坐标点的计算

4. 编制程序

（1）参数子程序（用于计算空间各参数坐标点）程序如下：

```
KONGJISHUAN.SPF;                  空间点计算子程序名
N05 R01=R01+R49*R09 R46=0;        R49=±1，取+1 时为加工斜外圆柱，取−1 时为加工斜圆孔
N10 WAICEN：R20=R20−R47;          孔深为外层循环，每铣完一层圆孔，深度再下刀
N15 R12=R20*SIN(R02);             计算 P 点的 Y 坐标，如图 4−50 所示
```

N20 R13=R20*COS(R02);	计算 *P* 点的 *Z* 坐标
N25 R32=R22+R20*SIN(R02);	孔中心点 *Y* 坐标 R07
N30 R33=R23+R20*COS(R02);	孔中心点 *Z* 坐标 R08
N35 G01 Y=R32 Z=R33;	深度方向进刀，第一次在孔中心，以后在 0° 位置
N40 MEICEN:;	孔圆周为内层循环开始
N45 R12=R01*COS(R46);	*OPX* 的长度
N50 R13=R01*SIN(R46);	*PPX* 的长度
N55 R31=R12;	最终切入零件轮廓的 *X* 坐标
N60 R32=R32+R13*SIN(R02);	最终切入零件轮廓的 *Y* 坐标
N65 R33=R32+R13*COS(R02);	最终切入零件轮廓的 *Z* 坐标
N70 G01 X=R31 Y=R32 Z=R33;	
N75 R46=R46+R48;	圆周角度改变，进行下个点插补
N80 IF R46<=360 GOTOB MEICEN;	孔圆周为内层循环结束
N85 IF R20>=R05 GOTOB MEICEN;	孔圆周为外层循环结束
N90 M17;	

（2）斜孔铣削主程序　在 TK6920 落地数控镗床上加工缸体斜内孔如图 4-51 所示。通过主程序调用相应 R 参数子程序，并赋予相应变量值，就可完成相应孔的加工，每加工完一个孔后，工作台（带 *B* 轴）旋转一个角度，加工下一个孔，直到加工完全部孔，结束程序。程序如下：

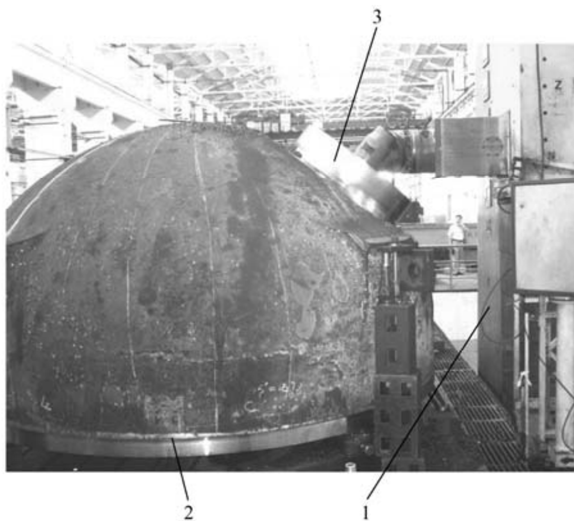


图 4-51　在 TK6920 落地数控镗床上加工缸体斜内孔

1—落地数控镗床　2—工件找正带　3—ϕ1194 斜圆孔

XIEKONG.MPF;	斜孔铣削主程序
N05 R01=0 R02=62 R49=−1;	R01=0 表示刀具先走到斜孔的中心位置，R02 为倾角，R49= −1 表示加工内孔
N10 R04=20 R05=−200;	起刀高度：设为 20mm，R05 表示孔的最终深度
N15 R06=0 R07=1150*SIN(62);	R07 斜孔中心的 *Y* 坐标
N20 R08=1150*COS(62);	R08 斜孔中心的 *Z* 坐标
N25 G00 G54 G90 X0 G17;	选择 *OXY* 平面，确定工件零点，绝对尺寸编程
N30 G00 Y=R07+20 Z=R08+20;	快速定位，50mm 为安全距离
N35 R20=R04;	设定斜孔初始高度
N40 R22=R20*SIN(R02)+R07;	考虑孔中心点坐标 R07
N45 R23=R20*COS(R02)+R08;	考虑孔中心点坐标 R08

```
N50 S1200 M03 F3;                 设定主轴转速、转向及进给速度
N55 G00 X=0 Y=R22 Z=R23;          快速接近工件，到达图 4-50 所示斜孔中心 P 起点位置
N60 KONGJISHUAN;                  调用子程序
N65 G01 X=0;                      由于是斜孔，退刀很关键，先将刀具退到孔底中心
N70 G00 Y=R22 Z=R23;              走斜线退到斜孔中心，千万不能直接抬刀
N75 M30;                          程序结束
```

点　评

传统的“摆活”方式加工斜面、斜孔、斜槽都是以牺牲效率换来的：工件要多次装夹，需要设计制造专用的工艺装备，加工中工件稳固性极差，又存在安全隐患等；而使用万向角度铣头加工类似零件，如 GE 缸各斜面、斜孔、斜槽等（图 4-50），也只需一次装卡工件，节省了工时、体力，产品精度得到了很好的保证，取得了较好的应用效果。同时，工件在加工中的安装基面就是工件以后的工作基面，稳固性好，也消除了加工中的安全隐患，说明通过万向角度铣头与 R 参数子程序编程的完美结合，完成斜面及其上的孔、槽的加工是完全可行的。另外，同一个 R 参数子程序 KONGJISHUAN，通过改变 R49 的值，实现斜面外圆柱/内孔的加工，一举多得，这就是“用脑力换体力、用脑力换效率、用脑力换质量”的方法，加工质量与效率得到了同步提高。

4.10　槽系加工

相关知识点

在复杂机电产品设计中，出现了大量的各类平面或空间槽结构元素。如图 4-52 所示的由螺旋线构成的空间槽，需要两个摆动轴即五轴机床才能加工，采用三轴机床近似加工难以避免原理误差。又如图 4-53 所示的摆臂零件，其内孔有对称的两处键槽，被键槽分割的相对内圆表面上分别分布着四处导程不同的螺旋槽，由于键槽的存在，使每一段螺旋槽在空间上均不能形成完整的螺旋线，这些结构元素对产品更新换代及满足用户个性化和多样化起到了积极的作用，但给制造工艺与数控编程增加了很大的难度，针对典型曲线槽结构元素，开展专题研究，分析它们的结构特点，建立相应的数学模型，给出编写程序的一般方法很有必要。

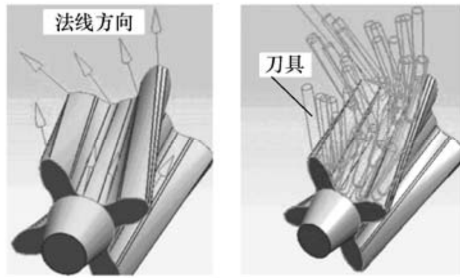


图 4-52　空间螺旋线型导动线形成的槽

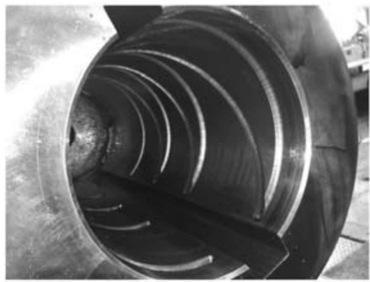


图 4-53　由螺旋线构成的空间槽

1．槽及槽的形成

为了满足各种需要，许多零件上设计了各种凹槽（简称“槽”），如传动轴上的键槽、轴承座上的油槽、凸轮机构的凸轮槽、螺旋机构的螺旋槽等，这些槽的共同特点是：总有一定的宽度和深度两个因素，如果凹槽的宽度和深度均等于零，则凹槽变成了纯数学上的曲线了。图 4-54a 所示为平面环形槽变成了一个圆，图 4-54b 所示为空间直线“槽”变成了一段空间直线，图 4-54c 所示为空间曲线“槽”变成了一条空间曲线，这时曲线的形状是决定“槽”的唯一因素，在零件上加工槽时，假定刀具的刀尖圆弧直径为零且刚好与工件表面接触，只要刀具完全按照曲线运动即由曲线引导刀具运动（导动），则加工出的槽（刀具形成的运动轨迹）就是这条曲线的复制，因此把这条曲线称为加工槽的“导动线”，于是在槽的加工过程中，只要按照槽的导动线编程，就可以加工槽了。

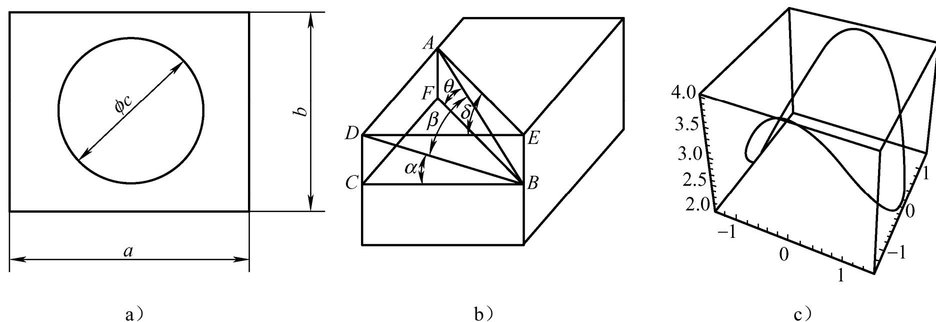


图 4-54　生成槽的导动线

2．常见零件槽导动线的种类

机电产品的零件上，存在各种各样的槽，常见槽的导动线主要有：

1）方程表达的直线或曲线。如直线、圆弧、抛物线、椭圆、最速降线、摆线、蜗线等，其中最主要、最常见的是直线、圆弧、抛物线与椭圆。

2）组合曲线。由上述几种单一直线或曲线组合而成，最常见的是直线与圆弧的组合、圆弧与圆弧的组合。

3）列表曲线。由一组坐标点拟合而成。

3．典型槽的一般数控编程步骤

由于槽的种类繁多，结构差异很大，很难给出一个标准的编程模式，现针对不带摆动轴的情况采用手动方式编程。给出参考步骤如下：

1）制订工艺方案，包括选用机床、夹具、刀具等内容。

2）槽的几何形状通过参数来确定，以便编写参数子程序或宏程序。

3）设计进给路线，包括起刀点、终点、刀补情况，切入切出方式等内容。

4）根据槽的导动线及槽底轮廓线方程的特点，确定采用哪种逼近方式编程。

5）选定循环变量。

6）根据精度要求，确定步距大小。

7）确定循环的起始与中止条件。

例 1：滑板润滑油槽的加工

如图 4-55 所示，在滑板工件上有若干油槽，油槽的分布是按工件最佳工作状态设计的。油槽从进油点开始进油，油槽深度为 5mm，到出油点时，油槽深度为 10mm，油槽底部是半径为 *R*4mm 的弧面，滑板的上下面、四周各面均已加工好，所需各点坐标见表 4-10。试设计油槽的加工方案并编写加工程序。

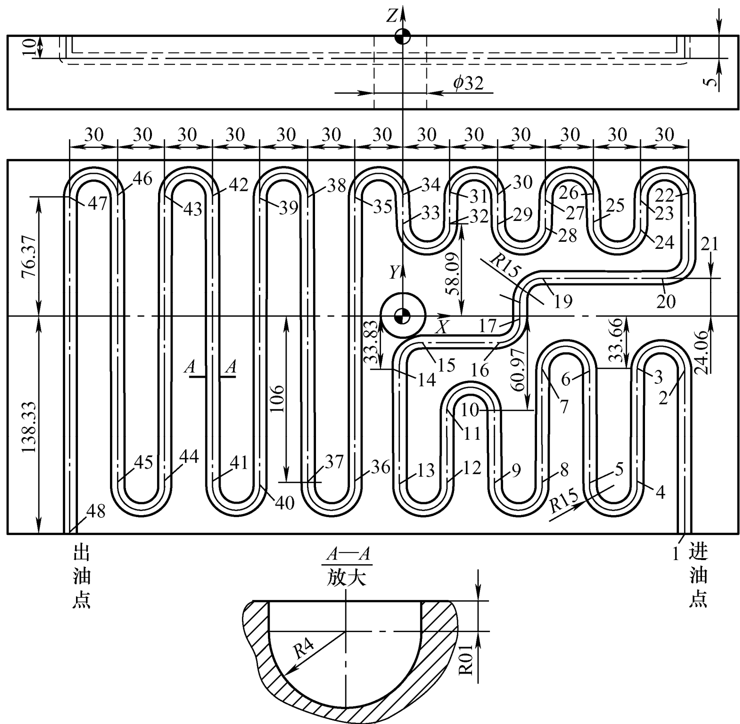


图 4-55　滑板润滑油槽

表 4-10　油槽各点坐标　（单位：mm）

点	*X*	*Y*	深度递增	*Z*	点	*X*	*Y*	深度递增	*Z*
1	180	−142	0	5	14	0	−33.83	0.125	6.2
2	180	−33.66	0.25	5.25	15	15	−18.83	0.025	6.225
3	150	−33.66	0.05	5.3	16	60	−18.83	0.05	6.275
4	150	−106	0.125	5.425	17	75	−3.83	0.025	6.3
5	120	−106	0.05	5.475	18	75	9.06	0.025	6.325
6	120	−33.66	0.125	5.6	19	90	24.06	0.025	6.35
7	90	−33.66	0.05	5.65	20	165	24.06	0.075	6.425
8	90	−106	0.125	5.775	21	180	39.06	0.025	6.45
9	60	−106	0.05	5.825	22	180	76.37	0.05	6.5
10	60	−60.97	0.075	5.9	23	150	76.37	0.05	6.55
11	30	−60.97	0.05	5.95	24	150	58.09	0.025	6.575
12	30	−106	0.075	6.025	25	120	58.09	0.05	6.625
13	0	−106	0.05	6.075	26	120	76.37	0.025	6.65

（续）

点	X	Y	深度递增	Z	点	X	Y	深度递增	Z
27	90	76.37	0.05	6.7	38	−60	76.37	0.375	7.8
28	90	58.09	0.025	6.725	39	−90	76.37	0.05	7.85
29	60	58.09	0.05	6.775	40	−90	−106	0.375	8.225
30	60	76.37	0.025	6.8	41	−120	−106	0.05	8.275
31	30	76.37	0.05	6.85	42	−120	76.37	0.375	8.65
32	30	58.09	0.025	6.875	43	−150	76.37	0.05	8.7
33	0	58.09	0.05	6.925	44	−150	−106	0.375	9.075
34	0	76.37	0.025	6.95	45	−180	−106	0.05	9.125
35	−30	76.37	0.05	7	46	−180	76.37	0.375	9.5
36	−30	−106	0.375	7.375	47	−210	76.37	0.05	9.55
37	−60	−106	0.05	7.425	48	−210	−142	0.45	10

1．工艺分析

滑板要保持最佳工作状态，润滑就非常重要，为了便于润滑油的流动，设计的油槽深浅就不一样，也就是说，细长的油槽在漫长而曲折的过程中，其槽底是不平的，需要通过三轴直线插补或螺旋线插补才能完成加工，考虑加工方便，选用 ϕ80mm 的球头铣刀来加工油槽，由于滑板的上下面、四周各面均已加工好，说明已有定位基准了，可以以已加工面为基准，用压板压紧工件，如图 4-56 所示。



图 4-56　滑板润滑油槽的装夹与加工

2．编制程序

程序如下：

```
HUABANCAO.MPF;                          滑板槽主程序名
N05 G54 G64 F150 S800 M03 T01;          设定零件的零点及加工参数
N10 G00 X180 Y−160 Z20;                 刀具在工件之外的安全位置起刀
N15 G01 Z−5 F100;                       下刀
N20 X180 Y−138.33 Z−5;                  走到 1 点，开始切入工件
N25 X180 Y−33.66 Z−5.25;                走到 2 点
N30 G03 X150 Y−33.66 Z−5.3 CR=15;       走到 3 点
N35 G01 X150 Y−106 Z5.425;              走到 4 点
```

```
N40 G03 X120 Y−106 Z−5.475 CR=15;          走到 5 点
N45 G01 X120 Y−33.66 Z−5.6;                走到 6 点
N50 G03 X90 Y −33.66 Z−5.65 CR=15;         走到 7 点
N55 G01 X90 Y−106 Z−5.775;                 走到 8 点
N60 G03 X60 Y−106 Z−5.825 CR=15;           走到 9 点
N65 G01 X60 Y−60.97 Z−5.9;                 走到 10 点
N70 G03 X30 Y−60.97 Z−5.95 CR=15;          走到 11 点
N75 G01 X30 Y−106 Z−6.025;                 走到 12 点
N80 G03 X0 Y−106 Z−6.075 CR=15;            走到 13 点
N85 G01 X0 Y−33.83 Z−6.2;                  走到 14 点
N90 G03 X15 Y−18.83 Z−6.225 CR=15;         走到 15 点
N95 G01 X60 Y−18.83 Z−6.275;               走到 16 点
N100 G03 X75 Y−3.83 Z−6.3 CR=15;           走到 17 点
N105 G01 X75 Y9.06 Z−6.325;                走到 18 点
N110 G03 X90 Y24.06 Z−6.35 CR=15;          走到 19 点
N115 G01 X165 Y24.06 Z−6.425;              走到 20 点
N120 G03 X180 Y39.06 Z−6.45 CR=15;         走到 21 点
N125 G01 X180 Y76.37 Z−6.5;                走到 22 点
N130 G03 X150 Y76.37 Z−6.55 CR=15;         走到 23 点
N135 G01 X150 Y58.09 Z−6.575;              走到 24 点
N140 G03 X120 Y58.09 Z−6.625 CR=15;        走到 25 点
N145 G01 X120 Y76.37 Z−6.65;               走到 26 点
N150 G03 X90 Y76.37 Z−6.7 CR=15;           走到 27 点
N155 G01 X90 Y58.09 Z−6.725;               走到 28 点
N160 G03 X60 Y58.09 Z−6.775 CR=15;         走到 29 点
N165 G01X60 Y76.37 Z−6.8;                  走到 30 点
N170 G03 X30 Y76.37 Z−6.85 CR=15;          走到 31 点
N175 G01 X30 Y58.09 Z−6.875;               走到 32 点
N180 G03 X0 Y58.09 Z−6.925 CR=15;          走到 33 点
N185 G01 X0 Y76.37 Z−6.95;                 走到 34 点
N190 G03 X−30 Y76.37 Z−7 CR=15;            走到 35 点
N195 G01 X−30 Y−106 Z−7.375;               走到 36 点
N200 G03 X−60 Y−106 Z−7.425 CR=15;         走到 37 点
N205 G01 X−60 Y76.37 Z−7.8;                走到 38 点
N210 G03 X−90 Y76.37 Z−7.85 CR=15;         走到 39 点
N215 G01 X−90 Y−106 Z−8.225;               走到 40 点
N220 G03 X−120 Y−106 Z−8.275 CR=15;        走到 41 点
N225 G01 X−120 Y76.37 Z−8.65;              走到 42 点
N230 G03 X−150 Y76.37 Z−8.7 CR=15;         走到 43 点
N235 G01 X−150 Y−106 Z−9.075;              走到 44 点
N240 G03 X−180 Y−106 Z−9.125 CR=15;        走到 45 点
N245 G01 X−180 Y76.37 Z−9.5;               走到 46 点
N250 G03 X−210 Y76.37 Z−9.55 CR=15;        走到 47 点
N255 G01 X−210 Y−138.33 Z−10;              走到 48 点
N260 Y−160;                                出刀
N265 G00 Z20 M05;                          抬刀
N270 M30;                                  程序结束
```

例 2：半圆槽系的加工

如图 4-57 所示，在圆形工件上有 24 个均匀分布的 U 形槽，槽宽 60mm，槽深 20mm，

圆弧半径为 30mm，毛坯为 ϕ600mm×100mm 的圆柱体，外形已加工，试编写加工程序。

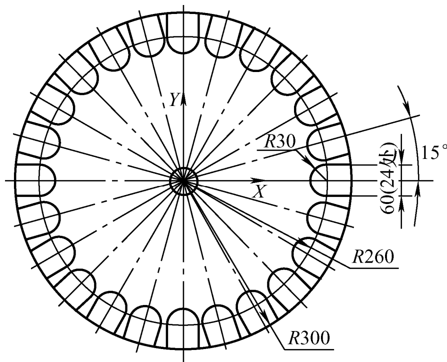


图 4-57　半圆槽系的加工

1．工艺分析

零件外形规则，被加工部分的各尺寸、表面粗糙度等有一定要求。图中仅包含了均布的 24 个 U 形槽，且大部分尺寸均达到 IT7～IT8 级精度。

选用机用虎钳装夹工件，找正机用虎钳固定钳口与工作台 *X* 轴移动方向平行。在毛坯铣削完毕后，在工件下表面与机用虎钳之间放入厚度适当的平行垫块，工件装夹之前用表检测垫块表面的平面度，工件露出钳口表面不低于 30mm，利用木锤或铜棒敲击工件，使平行垫块不能移动后夹紧工件。找正工件 *X* 轴、*Y* 轴零点位于工件对称中心位置。工件上表面为执行刀具长度补偿后的 *Z* 向零点表面。

2．编程思路

本例中的各槽，其导动线呈 U 形，按 U 形编程，设 R01 为角度累加，R02 为加工深度累加，坐标系按 R01 参数值每次累加 15°旋转。

3．加工工序安排和刀具选择

1）ϕ40mm 立铣刀粗铣均布的 24 个 U 形槽，保证尺寸深度和外形要求。

2）ϕ40mm 立铣刀精铣均布的 24 个 U 形槽，达到尺寸精度要求。

4．切削参数

半圆槽系加工的刀具与切削参数见表 4-11。

表 4-11　半圆槽系加工的刀具与切削参数

加 工 内 容	刀 具 规 格			主轴转速/（r/min）	进给速度/（mm/min）	刀具补偿半径
	刀号	刀具名称	材料			
粗铣 U 形槽	T01	40mm 立铣刀	硬质合金	350	160	D01
精铣 U 形槽	T02	40mm 立铣刀		350	160	D02

5．编制程序

主程序如下：

```
CAOXI.MPF；                              主程序名
N05 G54 G00 G90 X350 Y0 Z100；           确定工件零点，绝对尺寸编程等
```

```
N10 G00 Z60 T01 D01；                  选定 T01 刀具
N15 S350 M03 M07 F160；                设定主轴转速、转向及进给速度，切削液开
N20 CAOJIA R02=10；                    第一次加工的槽深为 10mm
N25 CAOJIA R02=19.5；                  第一次加工的槽深为 19.5mm
N30 G00 Z60 T02 D02；                  选定 T02 刀具
N35 S600 M03 M07 F100；                设定主轴转速、转向及进给速度，切削液开
N40 CAOJIA R02=20；                    精加工的槽深为 20mm
N45 M30；                              程序结束
```

子程序如下：

```
CAOJIA.SPF；                           槽加工子程序
N25 R01=0；                            从水平位置的槽开始加工，R01=0
N30 KM：ROT RPL=R01；                  坐标系按 R01 参数值旋转
N35 G00 X330 Y0；                      快速定位
N40 G00 Z=-R02；                       快速定位至 R02 参数值所设的深度位置
N45 G01 G42 D02 X310 Y-30；            执行刀具长度补偿
N50 G01 X260；                         直线插补
N55 G02 X260 Y30 CR=30；               顺时针圆弧插补
N60 G01 X310；                         直线插补
N65 G00 D00 X330 Y0；                  取消刀具半径补偿
N70 G00 Z30；                          Z 轴快速回退至 Z30 位置
N75 R01=R01+15；                       计算 R01 参数值
N80 IF R01<360 GOTOB KM；              如果 R01 小于 360° 就跳跃到 KM
N95 G00 Z50 M09；                      Z 轴快速回退至 Z30 位置并关闭冷却液
N100 ROT；                             取消坐标系旋转
N115 G00 G40 X350 Y0 Z100；            抬刀到安全位置，取消长度补偿
N120 RET；                             子程序返回
```

点　评

本节从槽的形成原理、加工方法及数控编程方法出发，研究了典型槽的数控编程，对提高槽的加工技术具有显著作用。

针对典型槽结构元素，采用 R 参数或宏程序编程，可以通过改变参数，完成一类槽的加工，不需重复编程，大大提高了工作效率。

第 5 章　其他数控系统编程

5.1　广数车削基础编程

相关知识点

1）GSK980TB/GSK980TB1 是广州数控设备有限公司研制的新一代普及型车床数控系统，*X*、*Z* 两轴联动，微米（μm）级插补精度，定位最高速度为 6m/min，插补最高速度为 6m/min，共 28 种 G 代码，包括 3 种单一固定循环代码和 6 种复合循环代码，20 种用户宏指令可读/写，最多 16 点输入/16 点输出，四重子程序调用，用户宏程序调用，螺纹功能有米制/英制、单线/多线的直螺纹、锥螺纹及端面螺纹，螺纹退尾长度可设定。

2）GSK218M 加工中心数控系统是广州数控设备有限公司自主研发的普及型数控系统，系统总共具有 79 种 G 代码，除具有 G00、G01、G02、G90、G91、G17、G18、G19 等通用 G 代码外，还具有以下较为实用的功能：可编程数据输入功能 G10、G11；米/英制数据输入及自动切换功能 G20、G21；自动拐角圆弧功能 G39；单方向定位功能 G60；缩放功能 G50、G51；旋转功能 G68、G69；极坐标功能 G15、G16 等。此外，该数控系统具有挖槽、扩孔的特殊固定循环指令 G22、G23、G24、G25、G26、G32、G33、G34、G35、G36、G37、G38，在钻铣加工中心上有很强的实用性。

例：传动轴加工工艺分析与编程

图 5-1 所示传动轴的材料为 40Cr，毛坯为自由锻造加工的锻件，毛坯大体尺寸为ϕ60mm×265mm，粗加工之后需要进行调质处理，调质硬度为 205～250HBW，试制订工艺方案并用广数系统编写车削加工程序。

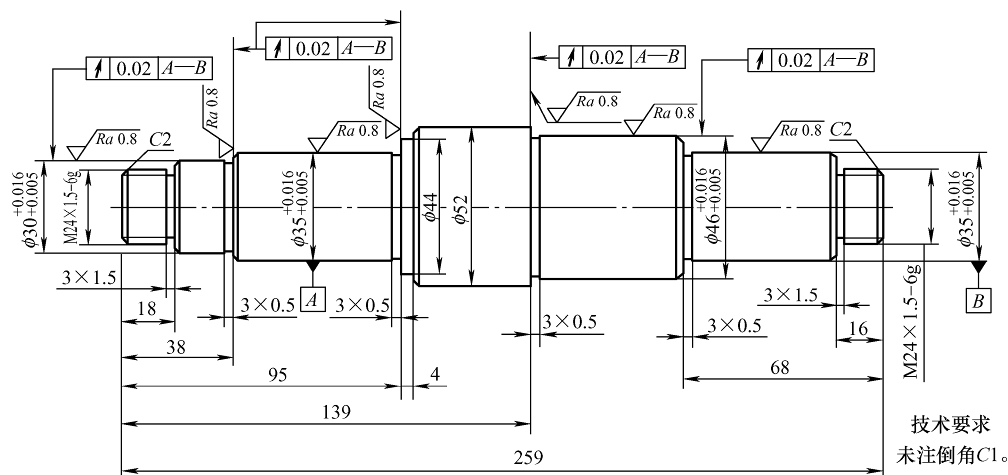


图 5-1　传动轴

1. 工艺分析

该件为细长轴零件，因毛坯直径大于 50mm，不能将毛坯伸入机床主轴孔中，只能采用一夹一顶的装夹方式。因工件长，两端配合表面有同轴度要求，不能一次装夹加工，为了确保尺寸精度和几何公差的要求，采用三次调头加工。

车削加工之前，划毛坯中心线和端面中心十字线，并在镗床上打一端中心孔 A3 并铣平端面，为车床加工做准备。

使用 4 把刀加工：90°合金精车偏刀（TOl00）、90°合金粗车偏刀（T0202）、合金切槽刀（T0303，刀宽 3mm）、60°合金螺纹车刀（T0404）。

2. 制订加工方案

制造过程为：锻→热→划→镗→普车→热→数车→钳→检→入库。

为了突出重点，本例仅对数车这道工序制订加工方案。

1）用自定心卡盘装夹棒料毛坯，车平右端面，调头夹ϕ60mm 车端面，保证工件总长为 259.2mm，重修（上述镗孔工序已钻中心孔，经热处理后，中心孔有变形）中心孔。

2）以一夹一顶装夹，用外圆粗车循环指令 G71 加工右边外圆ϕ52mm、ϕ46mm、ϕ35mm、M24mm 的位置，留精车余量。

3）调头夹ϕ46mm 外圆处，垫上铜皮以免夹伤已加工面，车端面，保证长度为 259mm，重修中心孔。

4）以一夹一顶装夹，用粗车循环指令 G71 加工左边ϕ44mm、ϕ35mm、ϕ30mm、M24mm 的位置，留精车余量。

5）用双顶尖装夹工件，用直线插补指令 G01 精加工零件右边外圆ϕ52mm、ϕ46mm、ϕ35mm、ϕ24mm 的位置。

6）切右边三道槽。

7）用螺纹车削循环指令 G92 加工右边的螺纹。

8）调头用双顶尖装夹工件，用直线插补指令 G01 精加工零件左边外圆ϕ44mm、ϕ35mm、ϕ30mm、M24mm 的位置。

9）切左边三道槽。

10）用螺纹车削循环指令 G92 加工左边的螺纹。

3. 程序编写

（1）零件右边粗加工　加工简图如图 5-2a 所示。程序如下：

O1751；	程序名
N05 G50 X50 Z10；	设置工件坐标系
N10 S2 M03 T0202；	主轴正转，转速为 380r/min，选用 90°偏刀
N15 G00 X61 Z2；	快速定位到ϕ61mm，距端面 2mm 处
N20 G71 U2 R0.5；	
N25 G7l P60 Q180 U0.8 W0.2 F100；	
N30 G00 X20； N35 G0l Z0 F40； N40 G00 X24 Z−2； N45 G01 X24 Z−16； N60 G01 X33；	粗加工ϕ24mm（外螺纹加工前的直径为 $D-0.13P=$ 23.805mm，先车到ϕ24mm）、ϕ35mm、ϕ46mm、ϕ52mm

程序	说明
N65 G0l X35 Z−17； N70 G01 X46 Z−69； N75 G0l X46 Z−120； N80 G01 X50 Z−120； N85 G01 X52 Z−12l； N90 G0l X52 Z−160；	粗加工 ϕ24mm（外螺纹加工前的直径为 D−0.13P=23.805mm，先车到 ϕ24mm）、ϕ35mm、ϕ46mm、ϕ52mm
N95 G00 X50 Z10；	快速返回刀具起点
N100 M05 T0100；	停主轴，取消刀补
N105 M30；	程序结束

（2）零件左边粗加工　加工简图如图 5−2b 所示。程序如下：

程序	说明
O1752；	程序名
N05 G50 X50 Z10；	设置工件坐标系
N10 S2 M03 T0202；	主轴正转，转速为 380r/min，选用 90° 合金粗车偏刀
N15 G00 X61 Z2；	快速定位至 ϕ61mm，距端面 2mm 处
N20 G7l U2 R0.5；	
N25 G7l P60 Q180 U0.8 W0.2 F100；	
N30 G00 X20； N35 G01 X20 Z0 F40； N40 G01 X24 Z−2； N45 G01 X24 Z−18； N50 G0l X28 Z−18； N55 G01 X30 Z−19； N60 G01 X30 Z−38； N65 G0l X33 Z−38； N70 G01 X35 Z−39； N75 G01 X35 Z−95； N80 G0l X42 Z−95； N85 G0l X44 Z−96； N90 G01 X44 Z−99；	粗加工 ϕ24mm、ϕ30mm、ϕ35mm、ϕ44mm

N95 G00 X50 Z10；快速返回刀具起点
N100 M05 T0100；停主轴，取消刀补
N105 M30；程序结束

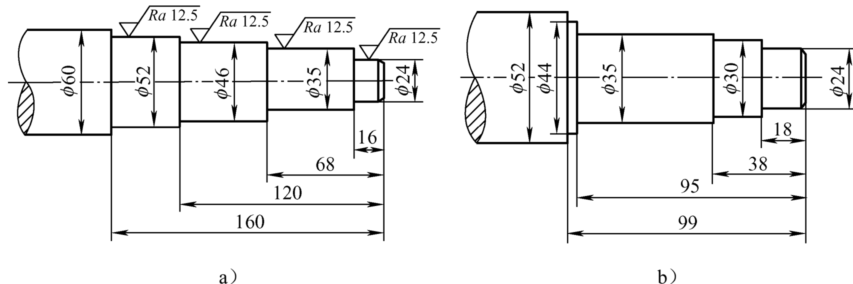


图 5−2　传动轴加工简图

（3）零件右端精加工（精车各外圆，包括切槽、车螺纹等）装夹方案如图 5−3 所示。程序如下：

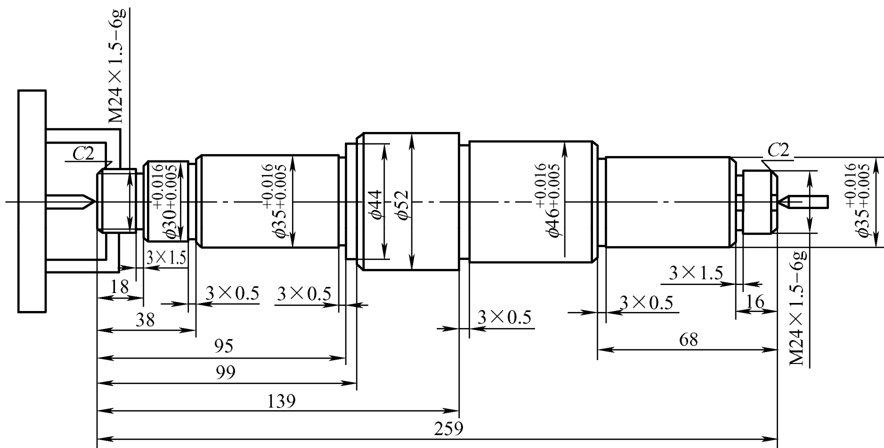


图 5-3　零件右端精加工装夹方案

```
O1753;                              程序名
N05 G50 X150 Z10;                   设置工件坐标系
N10 S2 M03 T0100;                   主轴正转，转速为 600r/min，选用 90° 合金精车偏刀
N15 G00 X30 Z2;                     快速定位至φ30mm，距端面 2mm 处
N20 G0l X20 Z2 F150;                定位至φ20mm，距端面 2mm 处
N25 G01 X20 Z0 F60;        ┐
N30 G01 X23.85 Z-2;        │
N35 G01 X23.85 Z-16;       │
N40 G01 X33;               │
N45 G0l X35 Z-17;          │
N50 G0l X35 Z-68;          ├        精车外圆φ24mm、φ35mm、φ46mm、φ52mm
N55 G0l X44 Z-68;          │
N60 G01 X46 Z-69;          │
N65 G01 X46 Z-120;         │
N70 G0l X51 Z-120;         │
N75 G0l X52 Z-120.5;       │
N80 G0l X52 Z-160;         ┘
N85 G01 X150 Z10;
N90 T0303;                          选用宽度为 3mm 的合金切槽刀
N95 G00 X36 Z-16;                   快速定位至φ36mm，距端面-16mm 处
N100 G94 X2l Z-16 F30;     ┐
N105 G00 X47;              │
N110 G00 Z-68;             │
N115 G94 X34 Z-68 F30;     ├        切三处槽
N120 G00 X54;              │
N125 Z-120;                │
N130 G94 X45 Z-120 F30;    ┘
N135 G00 X150 Z10;                  快速返回刀具起点
N140 T0404;                         选用 60° 合金螺纹车刀，车 M24×1.5 螺纹
N145 G00 X26 Z2;                    快速定位至φ26mm，距端面 2mm 处
N150 G00 X26 Z2;                    快速定位至φ26mm，距端面 2mm 处
N155 G92 X23.2 Z-14.5 F1.5;         第一次螺纹切深 0.8mm
N160 X22.6;                         第二次螺纹切深 0.6mm
```

N165 X22.2;　　　　第三次螺纹切深 0.4mm
N170 X22.04;　　　　第四次螺纹切深 0.16mm 到尺寸
N175 G00 X150 Z10;　　　　快速返回刀具起点
N180 M05 T0100;　　　　停主轴，取消刀补
N185 M30;

（4）零件左边精加工（切槽、车螺纹等）装夹方案如图 5-4 所示。程序如下：

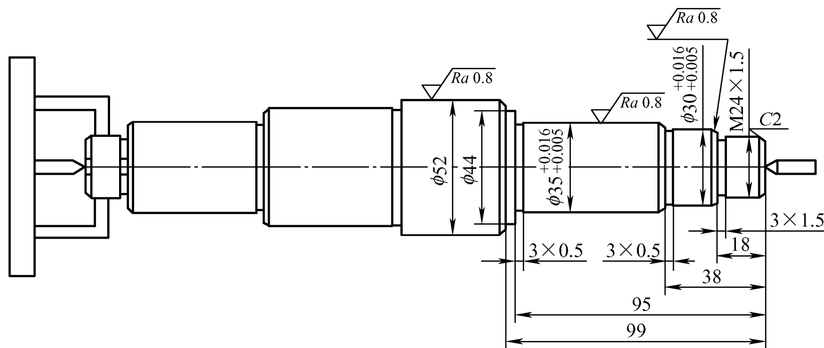


图 5-4　零件左端精加工装夹方案

O1754;　　　　程序名
N05 G50 X150 Z10;　　　　设置工件坐标系
N10 S2 M03 T0100;　　　　主轴正转，转速为 381r/min，选用 90°偏刀
N15 G00 X30 Z2;　　　　快速定位至φ30mm，距端面 2mm 处
N20 G0l X20 Z2 F150;　　　　定位至φ20mm，距端面 2mm 处

N25 G01 X23.85 Z–2 F60;
N30 G0l X23.85 Z–18;
N35 G0l X28 Z–18;
N40 G0l X30 Z–19;
N45 G0l X30 Z–38;
N50 G0l X33 Z–38;
N55 G0l X35 Z–39;
N60 G0l X35 Z–95;
N65 G01 X43 Z–95;
N70 G0l X44 Z–95.5;
N75 G01 X44 Z–99;
N80 G01 X50;
N85 G01 X52 Z–100;
（以上程序段：精车外圆φ24mm、φ30mm、φ35mm、φ44mm）

N90 G00 X150 Z10;　　　　快速返回刀具起点
N95 T0303;　　　　宽度为 3mm 的切断刀
N100 G00 X31 Z–18;　　　　快速定位至φ31mm，距端面–18mm 处

N105 G94 X21 Z–18 F30;
N110 G00 X36;
N115 G00 Z–38;
N120 G94 X29 Z–38 F30;
N125 G00 X45;
N130 G00 Z–95;
N135 G94 X34 Z–95 F30;
（以上程序段：切三处槽）

N140 G00 X150 Z10;　　　　快速返回刀具起点
N145 T0404;　　　　选用 60°合金螺纹车刀，车 M24×1.5 螺纹

N150 G00 X26 Z2；	快速定位至ϕ26mm，距端面 2mm 处
N155 G92 X23.2 Z–16.5 F1.5；	第一次螺纹切深 0.8mm
N160 X22.6；	第二次螺纹切深 0.6mm
N165 X22.2；	第三次螺纹切深 0.4mm
N170 X22.04；	第四次螺纹切深 0.16mm 到尺寸
N175 G00 X150 Z10；	快速返回刀具起点
N180 M05 T0100；	停主轴，取消刀补
N185 M30；	程序结束

点　评

本例采用的 GSK980TB/GSK980TB1 普及型车床数控系统，具有如下特点：

1）两轴联动、微米级插补，定位最高速度与插补最高速度均为 6m/min。

2）具有螺距误差补偿、半径补偿等功能，常用于教学或相对简单零件的车削加工。

5.2　FAGOR 数控系统编程

相关知识点

西班牙发格（FAGOR）公司是世界著名的集团公司，诞生于 1943 年西班牙的蒙德拉贡，产品涉及众多领域，如数控系统、伺服驱动、数显表和光栅等。CNC8070 是目前 FAGOR 最高档的数控系统，它是各种立式、卧式铣床及加工中心的理想控制器。用于高精度轮廓加工（要求程序段处理时间小于 1ms），可以对加速度及加速度的变化率进行控制，进而对刀具的变化进行平滑处理，可以减小机构对机床部件的冲击，延长机床使用寿命。

配备 FAGOR 数控系统的 TK6920 落地镗床，带有 *C* 轴运动功能（即 *C* 轴平旋盘），可以作圆周进给运动，从而铣削回转件的周边轮廓，编程与操作均很方便。操作时，通过程序“#CAX ON”起动 *C* 轴，这时的机床主轴可以作圆周进给运动，用“#CAX OFF”可以关闭该功能。一般中低档数控机床无此功能。

例 1：铣削加工平面轮廓零件一

如图 5-5 所示，平面轮廓零件由多段圆弧与直线构成，材料为 45 钢，在带有 FAGOR 数控系统的立式铣床加工，选用ϕ32mm 立铣刀，零件轮廓交接处按铣刀半径处理，试编写铣周边轮廓的加工程序。

1. 工艺分析

零件外形比较复杂，从尺寸标注上可以看出，有直角坐标系的标注形式，还有极坐标系的标注形式；零件轮廓的构成虽然都是圆弧与直线，但有圆心与半径标注、圆角，还有三点定圆等。只需要加工零件的轮廓及三个ϕ10mm 的孔，要求表面粗糙度值达到 Ra3.2μm，可预先在铣床上加工出工件的上、下表面及四周轮廓，以便加工轮廓时的装夹与找正。

工件装夹：选用机用虎钳装夹工件，找正机用虎钳，使固定钳口与工作台 *X* 轴移动方向平行。毛坯铣削完毕后，在工件下表面与机用虎钳之间放入厚度适当的平行垫块，装夹之前，

用表检测垫块表面的平面度，工件露出钳口表面要大于 20mm，利用木锤或铜棒敲击工件，使平行垫块不能移动后，找正并夹紧工件。*X* 轴、*Y* 轴零点位于工件对称中心位置。工件上表面为执行刀具长度补偿后的 *Z* 零点表面，选用ϕ32mm 的立铣刀与ϕ10mm 的钻头，图中未注过渡圆角按所加工刀具半径处理。

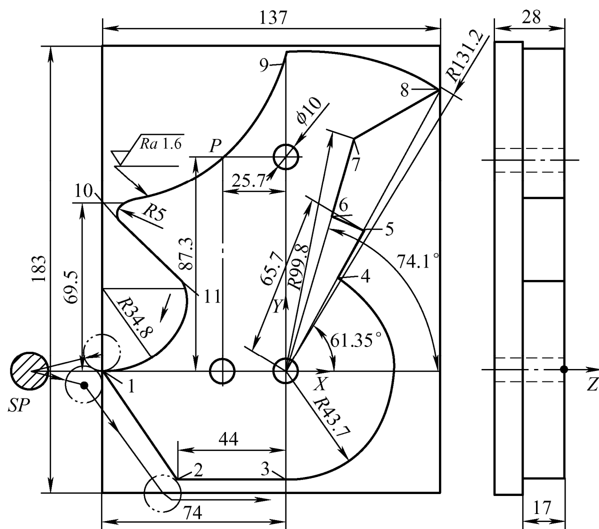


图 5-5　平面轮廓零件

2. 加工程序

FAGOR 数控系统与前面的 SINUMERIK、FANUC 编程有较大区别，注意此例中主程序名、极坐标的格式、圆弧格式、三点定圆格式及钻孔 G83 等。程序如下：

```
%PROGRAM;                              主程序名，%开头，后面是任意的英文字母
N05 G54 G90 G00 Z40;                   建立加工坐标系
N10 T01 M03 S500 F200;                 先铣面，选用φ32mm 立铣刀，主轴起动
N15 X−120 Y0;                          走到起始点
N20 G01 Z−17;                          下刀，深度按 17mm 加工
N25 G42 D02 X−74 Y0;                   走到切入点，开始加工工件
N30 X−44 Y−43.7;                       刀具到达 2 点，开始加工斜线轮廓
N35 X0;                                刀具到达 3 点
N40 G30 X0 Y0;                         G30 设定极坐标，当极心是圆弧中心时可省略
N45 G03 R43.7 Q61.35;                  刀具到达 4 点，R 为极半径，Q 为极角
N50 G01 R65.7;                         到第 5 点
N55 G03 Q74.1;                         到第 6 点
N60 G01 R99.8;                         到第 7 点
N65 G01 R131.2 Q61.35;                 到第 8 点
N70 G03 Q90;                           到第 9 点
N75 G09 X−74 Y69.5 I−25.7 J87.3;       非模态，用三点定义的圆弧，到第 10 点
N80 G36 I5;                            G36 半径圆角，编程格式为“G36 I<半径>;”
N85 G01 X=74−34.8 Y34.8;               到第 11 点
N90 G02 X−74 Y0 R34.8;                 到第 12 点
N95 G01 G40 X−120 Y0;                  回起始点
```

N100 Z50 M05；	准备换刀
N105 T02 D02 M06；	后钻孔，选用ϕ10mm 的钻头
N110 G00 G90 X0 Y0 Z50；	走到安全位置
N115 S1000 M03 M08 M41 F200；	钻孔参数
N120 G99 X−25.7 Y0；	第一个孔的位置
N125 G83 Z2 I−5 J4 B3 K1；	钻第一个孔，并退回到安全（参考）平面，K 为孔底暂停，I 为单步钻孔深度，J 为钻孔步数，B 为返回距离
N130 X0 Y0；	
N135 G98 X0 Y87.3；	钻第三个孔，并退回到返回（初始）平面
N140 M30；	

3. 编程说明

本例编程有四个特点：

1）应用了极坐标编程，G30 表示极心坐标，R 为极半径，Q 为极角，当极心是圆弧中心时可省略，“G30 I_ J_；”表示极心增量坐标。

2）使用了三点定义圆弧指令 G09，可通过编写终点和中间点（圆弧起点是运动的开始点）定义圆弧。

3）使用了圆角、半径过渡指令 G36，可以使用特定半径进行圆角，而不用去计算中心或圆弧起点和圆弧终点。

4）深孔加工，格式为“G83_ Z_ I_ J_ B_ K_ Z_；”，主要参数意义：

① G90 模式，坐标相对于工件零点；G91 模式，坐标相对于初始平面（Zi）。如果没有编写，采用刀具当前位置作为参考平面（Z=Zi）。

② 参数 I 为单步钻孔深度，符号表示加工方向；J 为钻孔操作需要的钻孔步数；B 为每次单步钻孔后快速退回（G00）的距离，如果没有编写，退回参考平面；K 为在孔底的暂停时间，单位为 s，如果没有定义，采用 0 值。

例 2：铣削加工平面轮廓零件二

气缸零件如图 5-6 所示，要加工的轮廓部位是一个大型汽轮机气缸零件的局部。零件质量为 178t，材质为 ZG25Cr1Mn2，毛坯为铸钢件。选择在 TK6920 落地数控镗床上加工，如图 5-7 所示。该机床带有 FAGOR 数控系统，该局部轮廓由多段圆弧与直线构成，利用 *C* 轴平旋盘加工周边轮廓，选用双刃可调镗刀，零件轮廓交接处按铣刀半径处理，试编写加工程序。

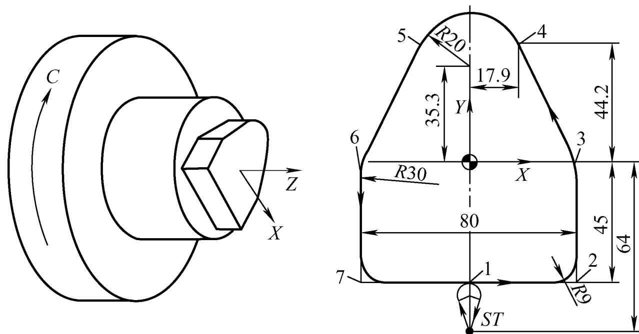


图 5-6 汽轮机气缸零件（局部）

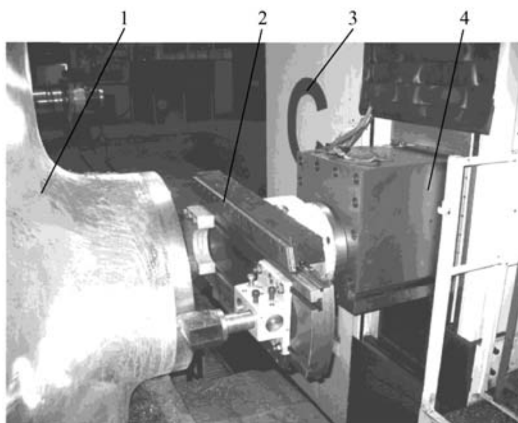


图 5-7　在 TK6920 落地数控镗床上加工气缸（局部）

1—气缸零件　2—平旋盘　3—机床 *C* 轴标识　4—镗床主轴

程序如下：

```
%PROGRAM;
N05 G54 G90 G00 Z40;             建立加工坐标系
N10 T01 M03 S500 F200;           选用φ32mm 双刃可调镗刀，主轴起动
N15 G01 Z−17;                    下刀，轮廓深度按 17mm 加工
#CAX ON;                         起动 C 轴，即激活主轴作 C 轴
N20 G90 X0 C−100;                走安全位置
N25 G01 G42 C−64 F600;           走到起始点 ST，完成刀补
N30 C−45;                        走到 1 点并按 G37 圆弧切入方式
N35 G37 I10;                     G37 圆弧切入方式，按半径 R10mm 切入工件
N40 G01 X40;                     走到 2 点
N45 G36 I9;                      G36 圆弧过渡方式，按 R9mm 过渡
N50 C0;                          C 轴运动，走到 3 点
N55 G36 I30;                     G36 圆弧过渡方式，按 R30mm 过渡
N60 G01 X17.9 C44.2;             走到 4 点
N65 G03 X−17.9 C44.2 R20;        G03 常规编程，走到 5 点
N70 G01 X−40 C0;                 走到 6 点
N75 G36 I30;                     G36 圆弧过渡方式，按 R30mm 过渡
N80 C−45;                        走到 7 点
N85 G36 I9;                      G36 圆弧过渡方式，按 R9mm 过渡
N90 X0;                          走到 1 点，加工结束
N95 G38 I10;                     G38 圆弧切出方式，按 R10mm 切出工件
N100 C−64;                       回到起始点 ST
N105 G90 G40 X0 C−100;           回安全位置，取消刀补
#CAX OFF;                        关闭 C 轴，主轴返回，成为普通主轴
N110 G01 Z40;                    抬刀
N115 M30;                        程序结束
```

相关知识点

FAGOR（CNC 8070）数控系统主要指令 G82、G88 介绍

1．G82 介绍

G82 是变步长往复式钻削循环，其动作及相关参数如图 5-8 所示，编程格式如下：

G82_ Z_ I_ D_ B_ H_ C_ J_ K_ R_ L_;

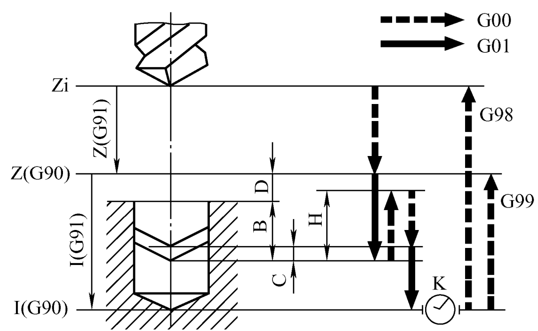


图 5-8　G82 的动作及相关参数

参数意义：

Z——参考平面。G90 时，坐标相对于工件零点；G91 时，坐标相对于初始平面（Zi）。如果没写 G90/G91，则采用刀具当前位置作为参考平面（Z=Zi）。

I——钻孔深度。G90 时，坐标相对于工件零点；G91 时，坐标相对于参考平面（Zi）。

D——参考平面和工件表面之间的距离，如果没有编写，则 D 为 0。

B——单步进给深度。所有的单步进给深度都是这个值，除了最后一次是由总深度调整。

H——每次单步进给钻孔后，快速（G0）返回距离或坐标。

C——接近坐标。定义从前一次钻削，纵向轴快速运动多大的距离（G0）接近零件进行下一次钻削。如果没有编写，采用 1mm。如果编写 C=0，系统发出错误报告。

J——定义在钻入多少以后，刀具快速（G0）返回参考平面（Z），如图 5-9 所示。当 J>1 时，每次单步进给后，刀具返回 H 指定的距离，每次步长为 J，到参考平面（Z）。当 J=1 时，每次钻入后返回到参考平面（Z）。如果没有编写 J 或是 J=0，则返回 H 指定的位置。

K——暂停时间，单位为 s，在孔的底部。如果没有定义，则采用 0 值。

R——增大或减小单步进给深度 B 的比例因子。单步进给深度第一步是 B，第二步是 RB，第三步是 R（RB）等。如果没有编写或 R=0，则采用 R=1。当 R=1 时，每次单步进给深度值都是 B 值。

L——定义钻入的最小值。用于 R 值不是 1 的情况。如果没有编写或编写 0 值，则采用值 1mm。

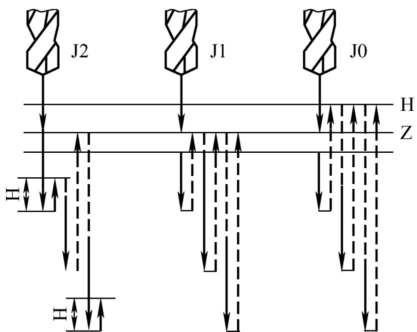


图 5-9　G82 参数 J 的意义

2. G88 介绍

G88 是圆柱型腔加工固定循环，动作及相关参数如图 5-10 所示，编程格式如下：

G88 Z_ I_ D_ J_ B_ C_ L_ H_ V_；

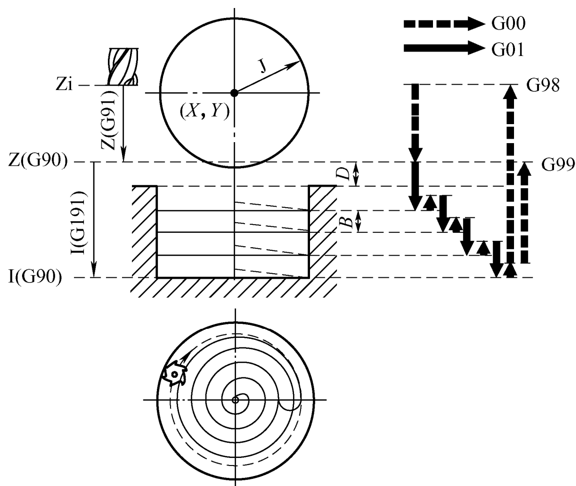


图 5-10　G88 的动作及相关参数

参数意义：

Z——参考平面。G90 时，坐标相对于工件零点；G91 时，坐标相对于初始平面（Zi）。如果没有编写，则采用刀具当前位置作为参考平面（Z=Zi）。

I——型腔加工深度。G90 时，坐标相对于工件零点；G91 时，坐标相对于参考平面（Z）。

D——参考平面和工件表面的距离，如果没有编写，则采用 0 值。

J——型腔半径。符号决定型腔加工方向：J+为顺时针方向，J–为逆时针方向。

B——定义沿纵向轴的切削深度。如果为 B+，则整个循环将用相同步长走刀，该步长等于或小于编程值；如果为 B–，则整个型腔将用给定步长走刀，最后一次走刀例外，它的步长为加工余量。

C——铣削路径或宽度。如果没有编写或编写 0 值，值为所选刀具直径的 3/4；如果值同参数 J 或 K（型腔长度/宽度的一半），仅进行精加工的路径；如果编写的值大于刀具直径，数控系统发出相关错误报告。

L——精加工量。如果没有编写或编写 0 值，则不执行精加工。

H——精加工进给率。如果没有编写或编程值为 0，则执行粗加工进给率。

V——刀具切入进给率。如果没有编写或编程值为 0，则执行在平面的进给率的一半。

例 3：铣削加工复合零件

图 5-11 所示的复合零件由菱形台、凸台、鸟岛及孔构成，除底面及 200mm×200mm 正方形已加工好之外，其余均要加工，工件上表面留有 2mm 的加工余量，材料为 45 钢，在带有 FAGOR 数控系统的立式铣床上加工，试编写加工程序。

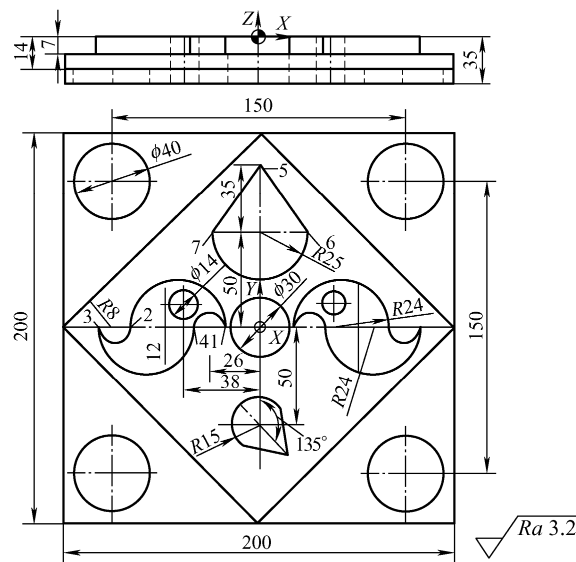


图 5-11　复合零件

1. 工艺分析

（1）技术要求　毛坯四周、底面、顶面已预先加工，可以作为加工基准。

（2）装夹定位的确定　采用机用虎钳装夹。

（3）加工刀具的确定　精铣上表面用ϕ80mm 面铣刀（NOVEX-F 201° 负前角面铣刀），铣菱形台轮廓用ϕ80mm 面铣刀，铣凸台、鸟岛用ϕ12mm 的立铣刀，用ϕ2.5mm 中心钻定出全部孔的位置，两个小孔的加工用ϕ13.8mm 钻头钻削、ϕ14H7mm 铰刀铰削，ϕ30mm 孔直接钻出，4 个大孔用ϕ32mm 的键槽铣刀采用螺旋铣固定循环加工。

（4）刀具与切削用量　刀具与切削用量见表 5-1。

表 5-1　刀具与切削用量

刀 具 号	型　号	切 削 用 量		
		a_p/mm	f/（mm/min）	s/（r/min）
T01	ϕ80mm 面铣刀	1.5	400	800
T02	ϕ12mm 立铣刀	1	300	1200
T03	ϕ2.5mm 中心钻	0.2	250	1500
T04	ϕ13.8mm 钻头	0.2	200	1200
T05	ϕ14H7mm 铰刀	0.2	50	400
T06	ϕ30mm 钻头	0.25	200	950
T07	ϕ32mm 键槽铣刀	2.0	140	1600

2. 编制程序

（1）顶面铣削加工程序（采用单向铣平面，如图 5-12 所示）　程序如下：

%XIDINMIAN；	铣顶面程序
N05 G54 G90 G00 Z100；	建立加工坐标系
N10 T01 M03 S800 F200；	选用ϕ80mm 面铣刀，主轴起动
N15 G00 Z20；	快速接近工件表面
N20 G01 X150 Y146；	走到 *ST* 起始点
N25 Z0；	下刀
N30 G01 Y79；	走到 1 点，开始第一刀加工平面
N35 G01 X−150；	走到 2 点
N40 G00 Y146；	走到出刀点
N45 X150；	走到 *ST* 起始点
N50 G01 Y24；	走到 3 点，开始第二刀加工平面
N55 G01 X−150；	走到 4 点
N60 G00 Y146；	走到出刀点
N65 X150；	走到 *ST* 起始点
N70 G01 Y−24；	走到 5 点，开始第三刀加工平面
N75 G01 X−150；	走到 6 点
N80 G00 Y146；	走到出刀点
N85 X150；	走到 *ST* 起始点
N90 G01 Y−79；	走到 7 点，开始第四刀加工平面
N95 G01 X−150；	走到 8 点
N100 G00 Y146；	走到出刀点
N105 X150 Z50 M05；	回到 *ST* 起始点，加工完毕
N110 M30	

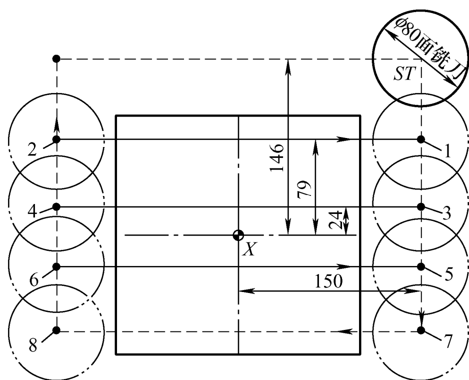


图 5-12　零件顶面铣削走刀路线

（2）铣菱形台轮廓（图 5-13）　程序如下：

%XILINGXINGN；	铣菱形程序
N05 G54 G90 G00 Z100；	建立加工坐标系
N10 T01 M03 S500 F200；	ϕ80mm 面铣刀，主轴起动
N15 G00 Z20；	快速接近工件表面
N20 X156.6 Y0；	走到 1 起始点，采用刀具中心点编程
N25 G01 Z−14；	下刀

```
N30 X0 Y156.6;               走到 2 点
N35 X−156.6 Y0;              走到 3 点
N40 X0 Y−156.6;              走到 4 点
N45 X156.6 Y0;               到起始点结束
N50 G00 Z50 M05;
N110 M30
```

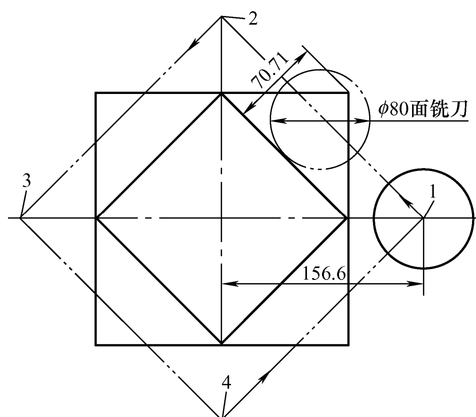


图 5-13　菱形台轮廓铣削进给路线

（3）铣鸟岛轮廓（图 5-14） 先在图 5-14 所示的坐标原点这个假想的位置编写出“鸟岛”的原始子程序，通过坐标平移、旋转、比例缩放、镜像等手段调用“鸟岛”子程序进行不同位置、不同大小、不同方位及成镜像关系的多个类似“鸟岛”的加工，得以实现快速编程。A、B 岛也可采用这种方法编程，如图 5-15 所示，其中双点画线就是表示 A 岛假想中的原始位置。

1）铣鸟岛子程序如下：

```
%L XIAONIAO;                 鸟岛子程序定义
N20 G01 X0 Y−27;             走到 ST 起始点
N25 Z0;                      下刀
N30 G01 G42 D02 X17 Y0;      走到 1 点，完成刀补，准备开始加工
N35 G02 X34 Y0 R8;           走到 2 点
N40 G03 X83 Y0 R24;          走到 3 点
N45 G02 X66 Y0 R8;           走到 4 点
N50 G03 X17 Y0 R24;          走到 1 点
N55 G01 X0 Y−27;             回到 ST 起始点
N60 M29;                     鸟岛子程序结束
```

2）铣鸟岛主程序如下

```
%XIDAO;                      鸟岛主程序
N05 G54 G90 G00 Z100;        建立加工坐标系
N10 T01 M03 S500 F200;       选用φ12mm 立铣刀，主轴起动
N15 G00 Z20;                 快速接近工件表面
N20 X0 Y−27;                 走到起始点
```

N25 G01 Z−7；	下刀
N30 LL XIAONIAO；	调用鸟岛子程序，加工右边“鸟岛”
N35 G12；	相对于 *Y* 轴镜像
N40 LL XIAONIAO；	调用鸟岛子程序，加工左边“鸟岛”
N45 G10；	对所有轴撤销镜像
N50 Z50 M05；	
N55 G00 X0 Y0；	
N60 M03；	

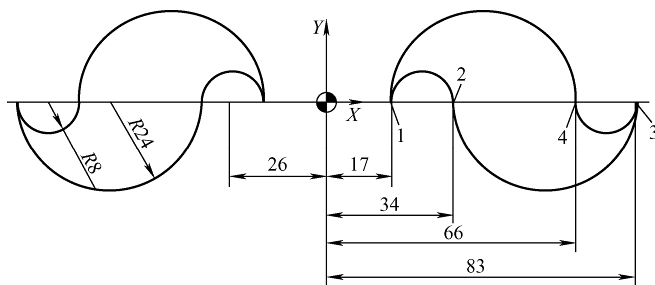


图 5-14　铣鸟岛轮廓

（4）A、B 岛加工（图 5-15）

1）A、B 岛加工原始子程序如下：

%L ADAO；	加工 A 岛原始子程序，图中双点画线所示
N05 G90 X0 Y60；	起刀点位置
N10 G01 Z−7；	下刀
N15 G01 G41 D05 X0 Y35；	走到 1 点，完成刀补
N20 G01 X25 Y0；	走到 2 点，开始加工
N25 G02 X−25 Y0 R25；	走到 3 点
N30 G01 X0 Y35；	走到 1 点，轮廓结束
N35 D40 X0 Y60 M05；	起刀点位置
N40 G00 Z30；	抬刀
N45 M29；	子程序结束

2）A、B 岛加工主程序

%ABXIDAO；	加工 A、B 岛主程序
N05 G54 G90 G00 Z100；	建立加工坐标系
N10 T0 M03 S500 F200；	选用ϕ12mm 立铣刀
N15 G00 Z20；	快速接近工件表面
N20 G158 X0 Y50；	预置新工件零点
N25 #CALL ADAO；	加工 A 岛
N30 G158 X0 Y−50；	预置新工件零点
N35 #SCALE [0.6]；	缩放因子=*R*15mm/*R*25mm 或 *R*21mm/*R*35mm=0.6
N40 G73 Q135 I20 J30；	坐标旋转 135°
N45 #CALL ADAO；	加工 A 岛
N50 G00 Z100；	
N55 M30；	

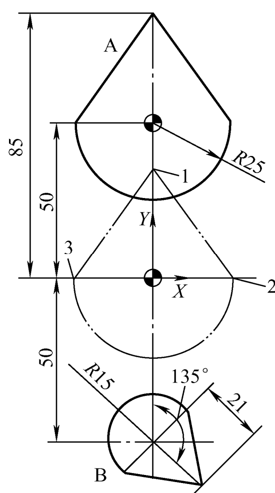


图 5-15　A、B 岛加工

（5）钻孔加工　程序如下：

%ZKONG；	孔加工主程序
N05 G54 G90 G00 Z100；	建立加工坐标系
N10 M06 T01；	换ϕ2.5mm 中心钻，钻中心孔
N15 G00 G90 X0 Y0 Z20；	Z20 为返回平面
N20 S1000 M03 M08 M41 F200；	
N25 G99 X38 Y12 G81 Z2 I–5；	Z2 为参考平面，I 为钻孔深度
N30 G98 X–38 Y12；	钻 2 个ϕ14mm 孔的中心孔
N35 G98 X0 Y0 G81 Z2 I–5；	钻ϕ30mm 孔的中心孔
N40 G99 X75 Y75 G81 Z2 I–5；	钻 4 个ϕ40mm 孔的中心孔
N45 X–75 Y70；	
N50 X–75 Y–75；	
N55 G98 X75 Y–75；	
N60 G00 Z100；	抬刀
N65 M6 T01；	换ϕ13.8mm 钻头，钻ϕ14mm 孔
N70 G00 G90 X0 Y0 Z25；	
N75 S1000 M3 M8 M41 F200；	
N80 G99 X38 Y12；	调用恒步长往复式深孔循环指令 G83
N85 G83 Z2 I–5 J4 B3 K1；	钻ϕ14mm 孔
N90 G98 X–38；	钻ϕ14mm 孔
N95 G00 Z100；	抬刀
N100 M06 T01；	换ϕ14H7 铰刀，铰ϕ14mm 孔
N105 G00 G90 X0 Y0 Z25；	
N110 S1000 M3 M8 M41 F200；	
N115 G99 X38 Y12 G85 Z2 I–35；	G85 铰孔指令，I 为孔深
N120 G98 X–38；	铰孔结束
N125 M06 T07；	换ϕ30mm 钻头，钻ϕ30mm 孔到尺寸
N130 G00 G90 X0 Y0 Z25；	
N135 S1000 M03 M8 M41 F200；	
N140 G98 X0 Y0；	
N145 G82 Z1 I–35 D1 B4 H3 C1 J3 K1 R0.8 L3；	调用变步长往复式钻削循环 G82
N150 Z50 M30；	抬刀，程序结束

（6）螺旋铣固定循环加工 4 个大孔　程序如下：

%XUANXI；	螺旋铣主程序
N05 G54 G90 G00 Z100；	建立加工坐标系
N10 M06 T08 D08 M03；	换ϕ32mm 键槽铣刀，刀具半径存于 D08 中
N15 G00 X0 Y0 Z20；	快速接近工件表面
N20 S1000 M3 M8 M41 F800；	
N25 G99 X75 Y75；	螺旋铣ϕ40mm 孔
N30 G88 Z35 I10 D10 J20 B5 C5 L1 H300 V50；	J 为加工圆半径，L 为精加工量，H 为精加工进给量，V 为切入进给量
N35 X−75 Y75；	
N40 X−75 Y−75；	
N45 G98 X75 Y−75；	螺旋铣ϕ40mm 孔结束
N50 Z50 M05；	
N55 X100 Y100；	
M60 M30；	

5.3　华中数控编程

相关知识点

武汉华中数控股份有限公司创立于 1994 年，通过自主创新，具备较强的系统配套能力，可生产 HNC-8、HNC-210、HNC-21、HNC-18/19 等高档、中档、普及型数控系统，以及全数字交流伺服主轴系统、全数字交流伺服驱动系统等产品。以“世纪星”系列数控单元为典型产品，HNC-21T 为车削系统，HNC-21/22M 为铣削系统。其主要特点如下：

1）最多联动轴数为四轴。

2）可选配各种类型的脉冲式、模拟式交流伺服驱动单元或步进电动机驱动单元以及 HSV-11 系列串口式伺服驱动单元。

3）除标准机床控制面板外，配置 40 路光电隔离开关量输入和 32 路开关量输出接口、手持单元接口、主轴控制与编码器接口。

4）独创的曲面直接插补算法和先进的数控软件技术。

例 1：冷冲压金属模具加工

图 5-16 所示为冷冲压金属模具，模具上面分布着三个冲压凸台及三个孔，材质为 40CrMoV2。毛坯为锻件，外形尺寸为 200mm×200mm×35mm，已加工到尺寸，且表面粗糙度 *Ra* 值已达 3.2μm。试制订加工工艺方案，并用华中 HNC-21M 数控系统指令格式编制零件的加工程序。

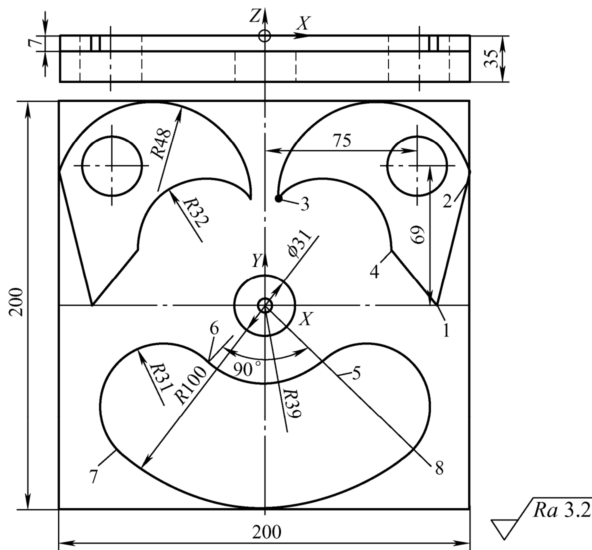


图 5-16　某厂生产的冷冲压金属模具

1. 工艺分析

（1）加工工艺路线　采取粗加工、半精加工及精加工方式，粗加工、半精加工手动进行。

（2）工件装夹方案　毛坯铣削完毕后，在铣床工作台上放上专用夹具，找正专用夹具水平及高度，在专用夹具中放上垫块，垫块厚度以保证工件露出夹具表面不少于 10mm 为准，同时垫块的位置还要避开三个ϕ31mm 孔的位置。工件装夹之前用百分表检测垫块表面的平面度，然后再放上工件，利用木锤或铜棒敲击工件，使平行垫块不能移动后，再夹紧工件。找正工件 X 轴、Y 轴零点位于工件对称中心位置。工件上表面为执行刀具长度补偿后的 Z 零点表面。工件最窄外宽度为 13mm，因此选用的刀具直径不得大于ϕ13mm。

（3）刀具选择　粗加工及半精加工主要是去掉大部分加工余量，要选用较大直径的刀具，粗加工时 3 点处的窄槽不加工，采用 MDI 方式。注意不要伤及 1 点处。精加工只是针对三个冲压凸台及三个孔。

2. 刀具及参数

刀具及切削参数见表 5-2。

表 5-2　刀具及切削参数

加工内容	刀具规格			主轴转速/（r/min）	进给速度/（mm/min）	刀具补偿	
	刀号	刀具名称	材料			长度	半径
粗、半精加工	T01	ϕ32mm 立铣刀	硬质合金	1000	500	H01	D01
精加工	T02	ϕ12mm 立铣刀	高速钢	800	200	H02	D02
	T03	ϕ2.5mm 中心钻	高速钢	1500	—	H03	D03
	T04	ϕ20mm 钻头	高速钢	1100	—	H04	D04
	T05	ϕ31mm 可调直镗刀	硬质合金	630	—	H05	D05

3. 数学计算

坐标值计算结果见表 5-3。

表 5-3　坐标值计算结果　（单位：mm）

坐标	X	Y	坐标	X	Y
1	83.87	0	4	62	28
2	100	65.25	6	−27.3	−27.3
3	6.5	52.83	7	−70.7	−70.7

4. 编制程序

（1）子程序部分

加工“月牙台”方法一：

```
%1011；
N05 G01 X0 Y0；                     走到起刀点 X0、Y0
N10 G01 G42 D01 X62 Y28；           到达 4 点，完成刀补，切入工件
N15 G03 X6.5 Y52.83 R32；           加工 R32mm 圆弧到达 3 点
N20 G02 X100 Y65.25 R48；           加工 R48mm 圆弧到达 2 点
```

```
N25 G01 X83.87 Y0;                  加工斜线到达 1 点
N30 G01 X62 Y28;                    加工斜线到达 4 点
N35 G01 G40 X0 Y0;                  取消刀补，回到工件中心起点
N40 M99
```

加工“腰形台”方法一：

```
%0012;
N05 G01 X0 Y0;                      走到工件中心点（起点）
N10 G01 G42 D01 X39 Y0;             走一段直线到 R39mm 圆弧延长线上，完成刀补
N15 G02 X−27.3 Y−27.3 R39;          加工 R39mm 圆弧到达 6 点
N20 G03 X−70.7 Y−70.7 R31;          加工 R31mm 圆弧到达 7 点
N25 G03 X70.7 Y−70.7 R100;          加工 R100mm 圆弧到达 8 点
N30 G03 X27.3 Y−27.3 R39;           加工 R31mm 圆弧到达 5 点
N35 G01 X0;                         此处没有切线方向退刀，但一定要避免法线退刀
N40 G01 G40 X0 Y0;                  取消刀补，回到工件零点
N45 M99
```

上述子程序的共同特点是：以工件中心位置（$X0$，$Y0$）作为子程序的起点和终点，编程及对刀均很方便。仔细分析一下，就会发现存在的问题，那就是工件中部出现了多次重复加工，其结果是出现“刀花或刀痕”等波纹现象，表面质量差，严重影响工件质量，这种情况应该避免。因此将上述子程序的进给轨迹进行重新设计，改进后的加工轨迹如图 5-17 所示，改进后子程序如下：

加工“月牙台”方法二：

```
%0013;
N05 G01 G42 D01 X0 Y100;            到达起点 ST2，Z=−7mm，深度方向不会出现重复加工
N10 G01 X54.12 Y100;                切线切入工件到达 P2 点
N15 G02 X100 Y65.25 R48;            加工 R48mm 的圆弧到达 2 点
N20 G01 X83.87 Y0;                  加工斜线到达 1 点
N25 G01 X62 Y28;                    加工斜线到达 4 点
N30 G03 X6.5 Y52.83 R32;            加工 R32mm 的圆弧到达 3 点
N35 G02 X54.12 Y100 R48;            加工 R48mm 的圆弧到达 P2 点
N40 G01 X100 Y100;                  切线切出工件到达 END2 点
N45 G00 G40 X130 Y130;              取消刀补，走到安全位置
N50 M99;                            子程序结束
```

加工“腰形台”方法二：

```
%0014
N05 G01 X0 Y−125;                   走到起点 ST1 点
N10 G01 G42 D01 X17.675 Y−107.32;   走一段直线到达 P1 点，完成刀补
N15 G03 X0 Y−100 R25;               R25mm 的过渡圆弧切入工件
N20 G02 X−70.7 Y−70.7 R100;         加工 R100mm 圆弧到达 7 点
N25 G02 X−27.3 Y−27.3 R31;          加工 R31mm 圆弧到达 6 点
N30 G03 X27.3 Y−27.3 R31;           加工 R39mm 圆弧到达 5 点
N35 G02 X70.7 Y−70.7 R31;           加工 R31mm 圆弧到达 8 点
N40 G02 X0 Y−100 R100;              加工 R100mm 圆弧到达切入点
N45 G03 X−17.675 Y−107.32 R25;      R25mm 的过渡圆弧切出工件
N50 G01 X0 Y−117.675;               回到起点 ST1
N55 M99;                            子程序结束
```

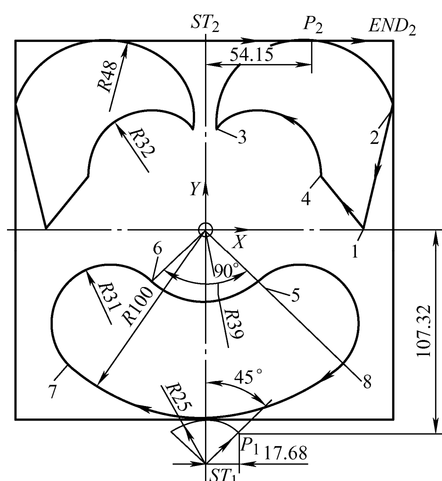


图 5-17　改进后的加工轨迹

（2）主程序部分（图 5-17） 程序如下：

%2010;	主程序名
N05 G90 G54 G17 G40 G49 G80 G21;	
N10 G91 G28 Z0;	
N15 T02 M06;	选用ϕ12mm 立铣刀
N20 S1200 M03;	
N25 G90 G00 X0 Y−120;	
N30 G43 G00 Z20 H01;	
N35 G01 Z−7 F1000;	下刀
N40 X0 Y−125;	走到 ST_1 起点
N45 M98 P0014 L1;	调用“腰形台”子程序一次，L1 可省略
N50 G00 Z50;	抬刀
N55 G00 X0 Y120;	走到 ST_2 起点附近
N60 G01 Z−7 F1000;	
N65 M98 P0013 L1;	调用加工“月牙台”子程序%0013 一次
N70 G24 X0;	关于 Y 轴的镜像功能
N75 M98 P0013 L1;	调用加工“月牙台”子程序%0013 一次
N80 G25;	关闭镜像功能
N85 G00 Z50;	抬刀
N90 G49 G00 Z100;	取消长度补偿
N95 T03 M06;	换ϕ2.5mm 中心钻
M100 M03 S1800;	
N105 G43 H03 Z50;	完成刀具长度补偿
N110 G00 X0 Y0;	走到工件中心位置，准备打第一个中心孔
N115 M08;	
N120 G98 G81 R5 Z−11 F200;	钻工件中心位置的ϕ31mm 孔的中心孔
N125 G99 G81 R5 Z−4 F200;	钻工件两边位置的ϕ31mm 孔的中心孔
N130 X75 Y69;	
N135 G98 X−75 Y69;	钻ϕ31mm 孔的中心孔结束
N140 G80;	取消 G81 钻孔固定循环功能
N145 G49 G00 Z100;	抬刀
N150 M09;	
N155 M05;	

```
N160 T03 M06;                          换φ20mm 钻头
N165 M03 S1500;
N170 G43 H03 Z20;                      完成刀具长度补偿
N175 G00 X0 Y0;                        走到工件中心位置，准备钻第一个孔
N180 M08;
N185 G99 G83 R5 Q–3 K2 Z–40.29 F200;   孔深=[35+（20/2）/tan118°]mm=40.29mm
N190 X75 Y69;
N195 G98 X–75 Y69;
N200 G00 Z50;                          抬刀
N205 G49 G00 Z100;                     取消长度补偿
N210 G00 X0 Y0 M05;                    回到中心位置
N215 M09;
N220 T05 M06;                          换φ31mm 可调直镗刀
N225 M03 S350;
N230 G43 H05 Z50;                      完成刀具长度补偿
N235 G00 X0 Y0;                        走到工件中心位置，准备镗第一个φ31mm 孔
N240 M08;
N245 G99 G85 R5 P0.1 Z–37 F80;         深孔=35mm+2mm=37mm，2mm 的出刀
N250 X75 Y69;
N255 G98 X–75 Y69;                     镗孔完毕
N260 G49 G00 Z100;                     抬刀
N265 G80 M09;                          取消 G85 镗孔固定循环功能
N270 M05;
N275 M30;
```

例 2：异形轴阀芯的加工

图 5-18 所示为异形轴阀芯，是用在热轧带钢机上的高压进水口的阀芯，外形由两个方程曲线及圆锥螺纹构成，尺寸要求较高，材质为 20MnMoNb。毛坯为锻件，外形尺寸为 ϕ80mm×160mm。试制订加工工艺方案，并用华中 HNC-21M 数控系统指令格式编制零件的加工程序。

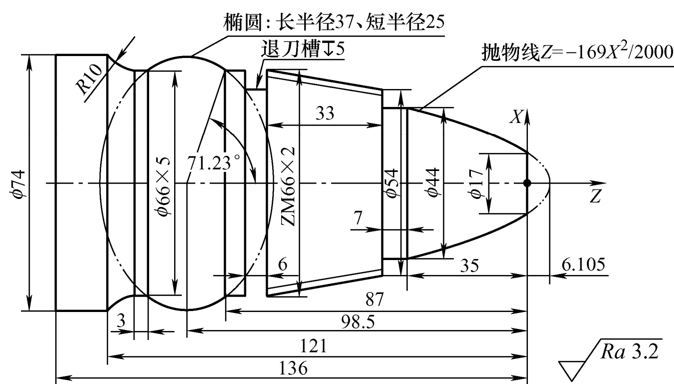


图 5-18　异形轴阀芯

1．工艺分析

（1）加工工艺路线　采取粗车与精车方式，粗加工调固定循环。

（2）工件装夹方案　该零件毛坯是ϕ80mm×160mm 的棒料。分粗、精加工两步完成。采

用通用自定心卡盘“一夹一顶”方式装夹。根据零件的尺寸标注特点及基准统一的原则，编程原点选择零件左端面。

（3）选择刀具　加工此零件所用车刀如下：T01 号端面车刀、T02 号 75°外圆车刀、T03 号 93°外圆车刀、T04 号 60°外圆车刀、T05 号 55°螺纹车刀。

刀具材料：粗加工，材料为 WAP10；精加工，材料为 WAK10。

刀片选择：粗加工，选择 DNMG 110408-NM7；精加工，选择 DNMG 110408-NS4。

（4）确定切削用量　根据粗加工背吃刀量为 3mm，进给量为 0.4mm/r，选择负型刀片 NM7 槽型，切削速度为 320m/min；根据精加工背吃刀量为 0.5mm，进给量为 0.1mm/r，选择正型刀片 NS4 槽型，选择切削速度为 400m/min。

2. 零件粗加工工艺与程序

用自定心卡盘夹工件一头，粗车端面及外圆，外圆按ϕ74mm 粗车，表面粗糙度 *Ra* 值按 3.2μm 控制。考虑工件一次装夹完成全部加工，留有夹头与切断量，端面见光即可，保证总长在 156～158mm。打中心孔，上顶尖，对 *A*、*B* 两个区域进行粗加工，如图 5-19 所示，图中涂黑部分就是精加工的余量。

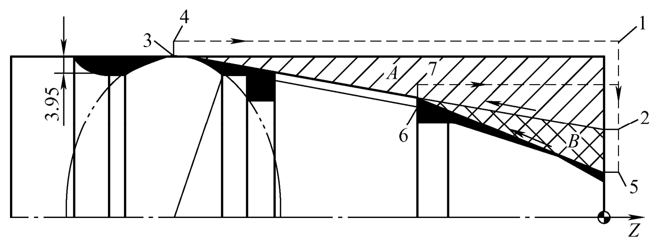


图 5-19　粗加工固定循环

（1）粗加工程序　程序如下：

%3001；

N05 M06 T0101；	选 01 号端面车刀车端面（图 5-19）
N10 G00 X100 Z50；	到换刀点位置
N15 M03 S400；	主轴转速为 1400r/min
N20 Z0；	走到车端面的起点
N25 G01 X0；	车端面
N30 G00 X100 Z50；	到换刀点位置
N35 T0201；	选 02 号 75°外圆车刀车外圆（图 5-19）
N40 G00 X74 Z30；	走到车外圆的起点
N45 G01 Z−136；	外圆按ϕ74mm 车削，表面粗糙度 *Ra* 值达 3.2μm
N50 G01 X85；	退刀
N55 G00 X100 Z50；	回到换刀点位置
N60 T0301；	选 03 号 93°外圆车刀
N65 M03 S400；	主轴转速为 400r/min
N70 G00 X105 Z4；	走到循环的起点 P_1 加工 *A* 区（图 5-20）
N75 G80 X99 Z−98 I−18 F200；	第 1 次循环，背吃刀量为 5mm
N80 X89 Z−98 I−18；	第 2 次循环，背吃刀量为 5mm
N85 X79 Z−98 I−18；	第 3 次循环，背吃刀量为 5mm
N90 X75 Z−98 I−18；	第 4 次循环，背吃刀量为 2mm，*A* 区域粗加工完成
N95 G00 X70 Z4；	走到循环的起点 P_2 加工 *B* 区（图 5-21）

N100 G80 X64 Z−42 I−17.5 F200；	第 1 次循环，背吃刀量为 5mm
N105 X54 Z−42 I−17.5；	第 2 次循环，背吃刀量为 5mm，*B* 区域粗加工完毕
N110 M30；	粗加工程序结束

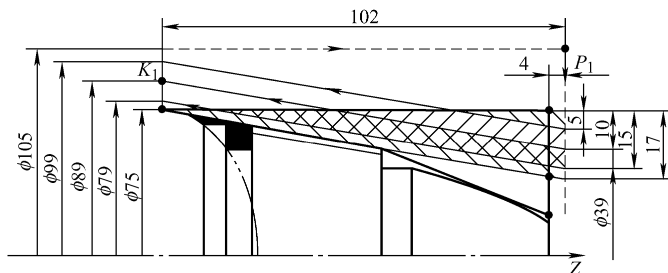


图 5-20　*A* 区域粗加工固定循环进给路线及坐标

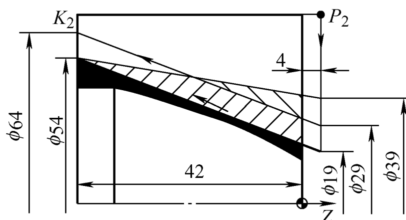


图 5-21　*B* 区域进给路线及坐标

（2）精加工程序　程序如下：

%3002；	选用 04 号 60°外圆车刀
N05 M06 TO401；	精加工外圆
N10 G00 X100 Z50；	到换刀点位置
N15 M03 S400；	
N20 G42 D06 X17 Z5；	到起点，完成刀补
N25 G01 X17；	切入工件
N35 #10=17/2；	*X* 坐标
N40 #11=6；	*Z* 坐标
N45 G37；	半径编程
N50 WHILE #10 LE 22；	
N55 G90 G01 X[#10] Z[−#11] F500；	
N60 #10=#10+0.1；	
N65 #11=169*#10*#10/2000−6.105；	
N70 ENDW；	抛物线方程曲线外形循环加工结束
N75 G36；	改成直径编程
N80 G01 W−7；	加工 ϕ44mm 外圆
N85 G01 X54；	车锥螺纹端面（图 5-22）
N90 G01 X66 W−33；	车锥螺纹端面
N95 G01 Z−87；	加工 ϕ66mm 外圆，到椭圆的起点位置
N100 #08=98.5；	椭圆中心
N105 #12=37；	椭圆长半径，对应 *X* 轴
N110 #13=25；	椭圆短半径，对应 *Z* 轴
N115 G37；	加工椭圆，半径编程
N120 #14=71.23；	圆心角变量
N125 #20=#12*SIN[#14]；	*X* 坐标计算表达式
N130 #21=#08−COS[#141；	*Z* 坐标计算表达式

```
N135 G01 X#20 Y#21 F150;                两轴联动进给车削椭圆
N140 #14=#14+0.5;                       圆心角变量每次增加 0.5°
N145 IF[#14 LT 108.77] GOTO 10;         圆心角不足 108.77°，转至 N10 段
N150 G36;                               椭圆加工结束，回到直径编程
N155 G01 W−3;                           车φ66mm×3mm 的外圆
N160 G02 X74 Z−121 R10;                 加工 R10mm 的圆弧
N165 G01 Z−136;                         精加工外形结束
N170 G00 X100;                          退刀
N175 G00 X100 Z50;                      回到换刀点位置
N180 TO701;                             选 7 号切槽刀，刀宽为 6mm
N185 M03 S400;                          主轴转速 400r/min
N190 G00 X75 Z−78;                      走到退刀槽的位置，准备切退刀槽
N195 G01 X56 F30;                       切退刀槽
N200 G00 X100;                          退刀
N205 G00 X100 Z50;                      回到换刀点位置
N210 TO501;                             选 5 号 55°螺纹车刀
N215 M03 S400;                          主轴转速为 1200r/min
N220 G00 X73 Z−37;                      走到螺纹加工的起点位置
N225 G76 C2 R0 E0 A60 X67 Z−78.5 I7 K1.299 U0.1 V0.1 Q0.9 F2;
N230 G00 X100 Z100 M05;                 返回程序起点位置或换刀点位置
N235 M30;                               主程序结束并复位
```

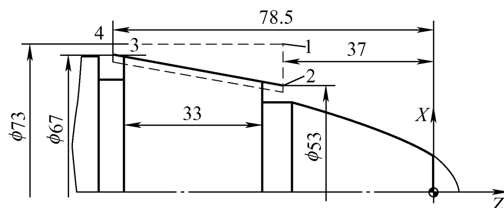


图 5-22　锥螺纹加工循环

相关知识点

本例中锥螺纹切削复合循环 G76（图 5-23，注意与第 4 章 FANUC 系统中 G76 的区别）说明如下：

格式：G76 C_ R_ E_ A_ X_ Z_ I_ K_ U_ V_ Q_ P_ F_；

其中：

A——刀尖角度，在 80°、60°、55°、30°、29°和 0°的 6 个角度中选一个。

C——精加工循环次数。

R——螺纹 *Z* 向退刀长度。

E——螺纹 *X* 向退刀长度。

X、Z——锥螺纹终点坐标。

K——螺纹高度（半径值）。

I——锥螺纹大、小径之差。

P——主轴初始转角。

F——螺纹导程。

V——最小背吃刀量（半径值）；

U——精加工余量（半径值），在图中用 d 表示；

Q——第一次背吃刀量（半径值），在图中用 Δd 表示；

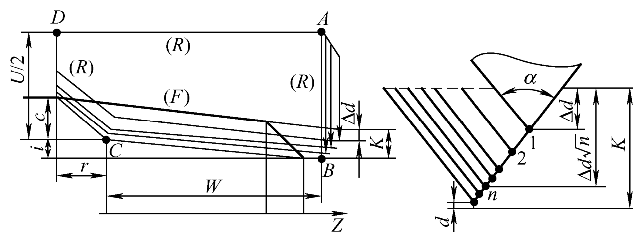


图 5-23　螺纹切削复合循环 G76

例 3：滤芯器组装件的加工

图 5-24 所示是某厂生产的蒸汽机起闭装置配合件——滤芯器组装件，由滤芯、环套两部分组成。这两部装配起来形成长半轴为 40mm、短半轴为 24mm 的椭圆，材质为 20CrMnNi，毛坯为锻件，尺寸分别为 ϕ60mm×125mm、ϕ60mm×75mm，试制订其加工工艺方案，并用华中 HNC-21M 数控系统指令编制零件的加工程序。

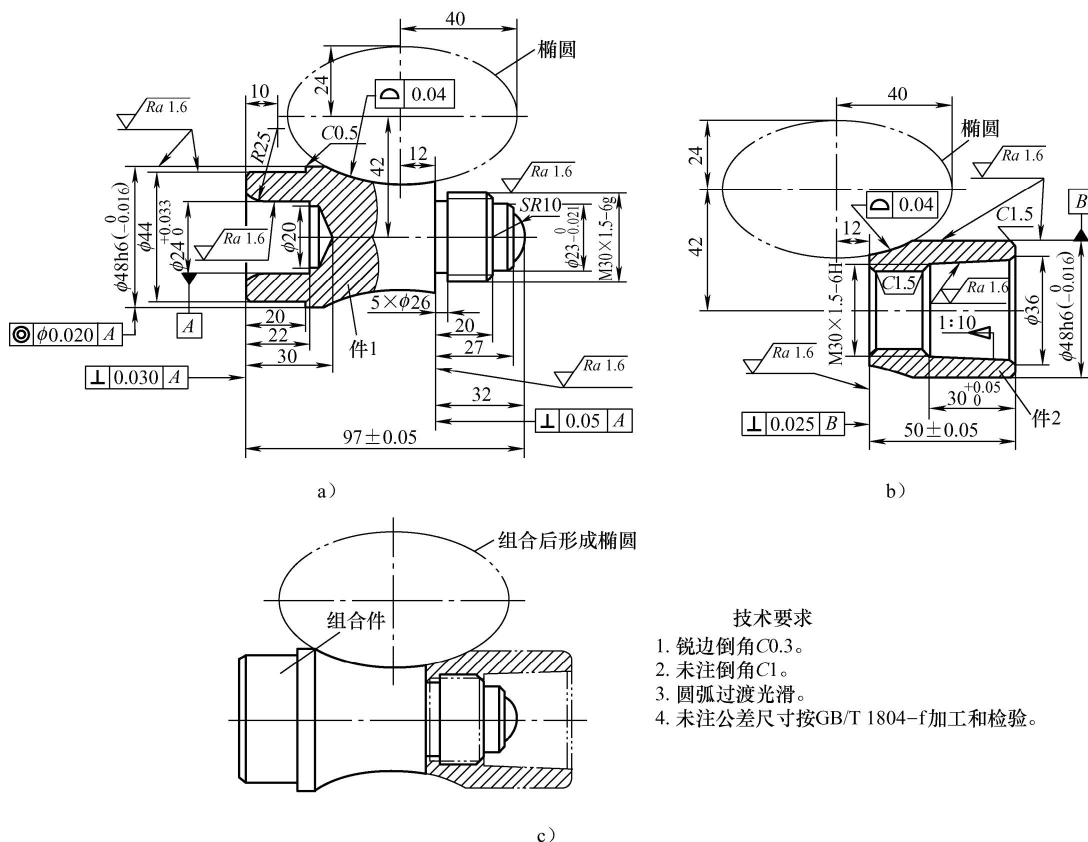


图 5-24　滤芯器组装件

a）件 1—滤芯　b）件 2—环套　c）组装件

1．工艺路线

1）先加工件 2 右端，如图 5-24b 所示，车ϕ48mm 外圆、锥孔及螺纹底孔至尺寸。

2）切断，保证长度 50mm±0.05mm。

3）调头找正，倒角并加工 M30×1.5 内螺纹，卸下待用。

4）再加工件 1 左端，如图 5-24a 所示，车ϕ44mm、ϕ48mm 及内腔至尺寸。

5）调头夹ϕ44mm×20mm，加工右端 *SR*10mm 球面、ϕ23mm、ϕ29.85mm 至尺寸。

6）切槽 5mm×ϕ26mm，加工外螺纹 M30×1.5。

7）将件 2 装配到（旋入）件 1 上，以件 1 的右端面为编程零点，组合加工椭圆面，这是零件加工的关键。

2．刀具设置

T01：93°菱形外圆车刀；

T02：切槽刀，刀具宽度为 4mm；

T03：60°外螺纹车刀；

T04：内孔镗刀；

T05：内切槽刀，刀具宽度为 3mm；

T06：60°内螺纹车刀。

3．加工程序

（1）加工件 2 右端主程序　程序如下：

%O8021；	加工件 2 右端主程序，程序名中的“2”表示件 2，“1”表示右端
N05 G90 G94；	绝对编程，每分钟进给
N10 M03 S800 T0101；	换 1 号 93°菱形外圆车刀，主轴转速为 800r/min
N15 G00 X55 Z0；	快速进刀
N20 G01 X30 F80；	车端面
N25 G00 X50 Z2；	快进到外径粗车循环起刀点
N30 G71 U1.5 R1 P60 Q80 X0.5 Z0.1 F150；	
N35 G00 X100 Z100；	退刀
N40 M05；	主轴停转
N45 M00；	程序暂停
N50 M03 S1500 T0101 F80；	精车转速为 1500r/min，进给速度为 80mm/min
N55 G00 X50 Z2；	快速进刀
N60 G01 X45；	
N65 Z0；	进到倒角起点
N70 X48 Z−1.5；	倒角
N75 Z65；	
N80 X50；	N60～N80，外径轮廓循环程序
N85 G00 X100 Z100；	退刀
N90 M05；	主轴停转
N95 M00；	程序暂停
N100 M03 S800 T0404；	主轴转速为 800r/min，换 4 号内孔镗刀
N105 G00 X20 Z5；	快进到内径粗车循环起刀点
N110 G71 U1 R0.5 P145 Q175 X−0.5 Z0.1 F120；	
N115 G00 Z100；	
N120 G40 X100；	退刀，取消半径补偿
N125 M05；	主轴停转

N130 M00；	程序暂停
N135 M03 S1200 T0404 F80；	精车转速为 1200r/min，进给速度为 80mm/min
N140 G00 X20 Z5；	进刀
N145 G41 G01 X37.4142；	完成刀具半径补偿
N150 Z0；	进到内径循环起点
N155 X36 Z−0.707；	
N160 X33 Z−30；	
N165 X31.3；	
N170 X28.3 Z−31.5；	
N175 Z65；	N145～N175 内径循环轮廓程序
N180 X19.5；	*X* 向退刀
N185 G00 Z100；	
N190 G40 X100；	退刀，取消刀具半径补偿
N195 M05；	主轴停转
N200 M00；	程序暂停
N205 M03 S600 T0202 F25；	换切槽刀，主轴转速为 600r/min
N210 G00 X50 Z64；	进刀
N215 C01 X27 F25；	切断，进给速度为 25mm/min，
N220 G00 X100；	*X* 向退刀
N225 Z100；	*Z* 向退刀
N230 M05；	主轴停转
N235 M30；	程序停止

说明一：

1）N30 句为外径粗车循环；U 为径向每次背吃刀量，单边为 1.5mm；R 为径向退刀量，单边为 1mm；P 为精加工循环第一程序段号 60；Q 为精加工循环最后程序段号 80；X 为径向精加工余量，双边是 0.5mm；Z 为轴向精加工余量，本例为 0.1mm；F 为粗车进给速度，本例为 150mm/min。

2）N110 句为内径粗车循环；U 为径向每次背吃刀量，单边为 1mm；R 为径向退刀量，单边为 0.5mm；P 为精加工循环第一程序段号 145；Q 为精加工循环最后程序段号 175；X 为径向精加工余量，双边为 0.5mm；*Z* 轴向精加工余量，本例为 0.1mm；F 为粗车进给速度，本例为 120mm/min。

（2）加工工件 2 左端主程序　程序如下：

%O8022；	加工件 2 左端主程序，主程序名中的第一个“2”表示件 2，第二个“2”表示左端
N05 G90 G94；	绝对编程，每分钟进给
N10 S1000 M03 T0404 F80；	换 4 号内孔镗刀，主轴转速为 1000r/min，进给速度为 80mm/min
N15 G00 X32 Z1；	快进到倒角起点
N20 G01 X27 Z−1.5；	倒角 *C*1.5
N25 G00 Z100；	
N30 X100；	退刀
N35 M05；	主轴停转
N40 M00；	程序暂停
N45 M03 S1000 T0606；	换 6 号 60°内螺纹车刀，主轴转速为 1000r/min
N50 G00 X28 Z5；	进到内螺纹复合循环起刀点
N55 G76 C2 R−1 E−0.5 A60 X30.05 Z−21 I0 K0.93 U−0.05 V0.08 Q0.4 P0 F1.5；	
N60 G00 Z100；	

N65 X100； 退刀
N70 M05； 主轴停转
N75 M30； 程序停止

说明二：

N55 句为内螺纹复合循环；C 为精加工次数，本例为 2；R 为轴向退刀量，本例为 1mm；E 为径向退刀量，本例为 0.5mm；A 为刀尖角度，本例为 60°；X 为有效螺纹终点的 *X* 坐标，本例为 30.05mm；Z 为有效螺纹终点的 *Z* 坐标，本例为−21mm；I 为螺纹两端半径差，本例为 0；K 为螺纹高度，单边为 0.93mm；U 为精加工余量，单边为 0.05mm；V 为最小背吃刀量，0.08mm；Q 为第一次背吃刀量，单边为 0.4mm；P 为主轴转角，本例为 0°；F 为螺纹导程，本例为 1.5mm。

（3）加工件 1 左端主程序　程序如下：

%O8011； 加工件 1 左端主程序，程序名中第一个“1”表示工件 1，第二个“1”表示左端
N05 G90 G94； 绝对编程，每分钟进给
N10 M06 T0101； 换 1 号 93°菱形外圆车刀
N15 M03 S800；
N20 G00 X55 Z0； 进刀
N25 G01 X18 F80； 车端面
N30 G00 X50 Z2； 进到外圆粗车循环起刀点
N35 G71 U1.5 R1 P60 Q90 X0.5 Z0.1 F150； 外圆粗车循环
N40 G00 X100 Z100 M05； 退刀，主轴停止
N45 M00； 程序暂停
N50 M06 T0101； 换 1 号 93°菱形外圆车刀精车，主轴转速为 1500r/min
N55 S1500 M03 G00 X50 Z2； 快速进刀
N60 G01 X42 F80；
N65 G01 Z0；
N70 X44 Z−1；
N75 Z-20； 外圆轮廓循环程序
N80 X48；
N85 Z-35；
N90 X50；
N95 G00 X100 Z100； 退刀
N100 M05； 主轴停转
N105 M00； 程序暂停
N110 M06 T0404 S800； 换 4 号内孔镗刀，主轴转速为 800r/min
N115 M03 G00 X19.5 Z5； 进到内孔粗车循环起刀点
N120 G71 U1 R0.5 P155 Q170 X−0.5 Z0.1 F120； 内径粗车循环
N125 G00 Z100；
N130 G40 X100； 退刀，取消刀具半径补偿
N135 M05； 主轴停转
N140 M00； 程序暂停
N145 S1200 M03； 精车内孔，主轴转速为 1200r/min，进给速度为 80mm/min
N150 G00 X20 Z5； 快进到内孔精车循环起刀点
N155 G01 G41 X28.1742 F80； 引入刀具半径补偿
N160 Z00； 进到内孔循环起点
N165 G02 X24 Z−10 R25；
N170 Z−22； N155～N170 内径循环轮廓程序

N175 X19.5；	退刀
N180 G00 Z100；	
N185 G40 X100；	退刀，取消刀具半径补偿
N190 M05；	主轴停转
N195 M30；	程序停止

说明三：

1）N35 为外径粗车循环；U 为径向每次背吃刀量，单边为 1.5mm；R 为径向退刀量，单边为 1mm；P 为精加工第一程序段号 60；Q 为精加工最后程序段号 90；X 为径向精加工余量，双边为 0.5mm；Z 为轴向精加工余量，本例为 0.1mm；F 为粗车进给速度，本例为 150mm/min。

2）N120 为内径粗车循环；U 为每次背吃刀量，单边为 1mm；R 为退刀量，单边为 0.5mm；P 为精加工第一程序段号 155；Q 为精加工最后程序段号 170；X 为精加工余量，双边为 0.5mm；Z 为精加工余量，本例为 0.1mm；F 为粗车进给速度，本例为 120mm/min。

（4）加工件 1 右端主程序

%O8012；	加工件 1 右端主程序，1 表示工件 1，2 表示右端
N10 G90 G94；	绝对编程，分进给
N15 M03 S800 T0101；	主轴转速为 800r/min，换 1 号 93°菱形外圆车刀
N20 G00 X55 Z0；	快速进刀
N25 G01 X0 F80；	车端面
N30 G00 X50 Z2；	进到外径粗车循环起刀点
N35 G71 U1.5 R1 P65 Q130 X0.5 Z0.1 F150；	外轮廓粗车循环
N40 G40 G00 X100 Z100；	退刀，取消刀具半径补偿
N45 M05；	主轴停转
N50 M00；	程序暂停
N55 M06 T0101；	换刀
N60 M03 S1500 F80；	精车转速为 1500r/min，进给速度为 80mm/min
N65 G00 X5 Z5；	快速进刀
N70 G01 G42 X0 Z0；	建立刀具半径补偿
N75 G03 X17.32 Z−5 R10；	
N80 G01 X21；	
N85 X23 Z−6；	
N90 Z−12；	
N95 X28；	
N100 X29.8 Z−13；	
N105 Zd2；	
N110 X39；	
N115 Z44；	
N120 X48.5；	
N125 Z−72；	
N130 X50；	N65～N130 外径循环轮廓程序
N135 G40 G00 X100 Z100；	退刀，取消刀具半径补偿
N140 M05；	主轴停转
N145 M00；	程序暂停
N150 M06 T0202；	换 2 号切槽刀
N155 G00 M03 S600 X33 Z−31；	快速进刀，主轴转速为 600r/min
N160 G01 X26.2 F30；	切槽，进给速度为 25mm/min
N165 X30；	退刀

```
N170 Z-32;                     进刀
N175 X26;                      切槽
N180 Z-31;                     精加工槽底
N185 G00 X100;
N190 Z100;                     退刀
N195 M05;                      主轴停转
N200 M00;                      程序暂停
N205 M06 T0303;                换 3 号 60° 外螺纹车刀
N210 G00 X30 Z-5 M03 S1000;    快进至外螺纹复合循环起刀点，主轴转速为 1000r/min
N215 G76 C2 R-0.5 E1 A60 X28.14 Z-27.5 I0 K0.93 U0.05 V0.1 Q0.4 P0 F1.5;
N220 G00 X100 Z100;            退刀
N225 M05;                      主轴停转
N230 M30;                      程序停止
```

说明四：

1）N35 为外轮廓粗车循环；U 为径向每次背吃刀量，单边为 1.5mm；R 为径向退刀量，单边为 1mm；P 为精加工第一程序段号 65；Q 为精加工最后程序段号 170；X 为精加工余量，双边为 0.5mm；Z 为精加工余量，本例为 0.1mm；F 为粗车进给速度，本例为 150mm/min。

2）N215 为外螺纹复合循环；C 为精加工次数，本例为 2；R 为轴向退刀量，本例为 0.5mm；E 为径向退刀量，本例为±1mm；A 为刀尖角度，本例为 60°；X 为有效螺纹终点的 *X* 坐标，本例为 28.14mm；Z 为有效螺纹终点的 *Z* 坐标，本例为−27.5mm；I 为螺纹两端半径差，本例为 0；K 为螺纹高度，单边为 0.93mm；U 为精加工余量，单边为 0.05mm；V 为最小背吃刀量，本例为 0.1mm；Q 为第一次背吃刀量，本例为单边 0.4mm；P 为主轴转角，本例为 0°；F 为螺纹导程，本例为 1.5mm。

（5）件 1 与件 2 组合起来加工椭圆面（零件加工的关键） 将件 2 装配到（旋入）件 1 上，以件 1 的右端面为编程零点，组合加工椭圆面。由于旋合螺纹不起定位作用，为了保证两工件的同轴度要求，在件 2 上预先配上中心堵，按“一夹一顶”方式装夹工件，按ϕ48h6 基准 *B*，打表找正“组合件”两端ϕ48h6 的外圆面，误差小于 0.007mm。先将椭圆部位粗加工成凹槽，再精加工椭圆成形，如图 5-25 所示。

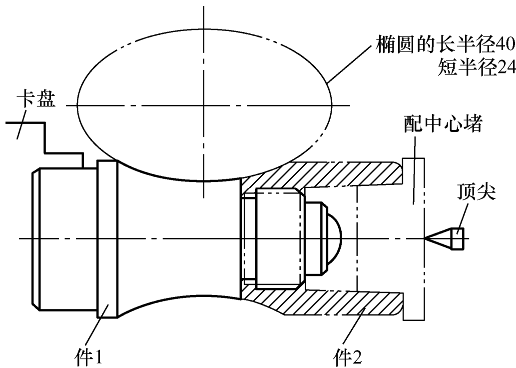


图 5-25　滤芯器组装件椭圆的加工

```
%O800;                         加工件 1、2 组装件椭圆
N05 G54 G90 G94;               绝对编程，分进给
N10 M06 T0101;                 换 1 号刀，椭圆部位粗加工成凹槽
```

```
N15 M03 S800；                          主轴转速为 800r/min
N20 G00 X55 Z−15；                      快进到凹槽外径粗车循环起刀点
N25 G71 U1.5 R1 P60 Q110 E0.3 F120；
N30 G40 G00 X100 Z100；                 退刀，取消刀具半径补偿
N35 M05；                               主轴停转
N40 M00；                               程序暂停
N45 M03 S1500 T0101 F80；               精车转速为 1500r/min，进给速度为 80mm/min
N50 G00 X55 Z−15；                      快进到起刀点
N55 C01 G42 Z−17.543；                  建立刀具半径补偿
N60 X50；
N65 #1=40；                             #1 设为椭圆长半轴变量
N70 #2=24；                             #2 设为椭圆短半轴变量
N75 #3=26.458；                         Z 轴变量起始尺寸
N80 WHILE #3 GE [−26.458]；             判断 Z 轴尺寸是否到终点
N85 #4=24*SQRT[#1*#1−#3*#3]/40；        计算 X 变量
N90 G01 X[2*42−2*#4] Z[#3−44]；         椭圆插补
N95 #1=#1−0.4；                         Z 轴每次步距 0.4mm
N100 ENDW；
N105 G01 X48 ZQ0.458；
N110 X50；                              N60～N110 加工椭圆外形循环轮廓
N115 G00 X100；
N120 G40 Z100；                         取消刀具半径补偿，退刀
N125 M05；                              主轴停转
N130 M30；                              程序停止
```

说明五：

N25 为外轮廓粗车循环，凹槽外径粗车循环；U 为径向每次背吃刀量，单边为 1.5mm；R 为径向退刀量，单边为 1mm；P 为精加工第一程序段号 60；Q 为精加工最后程序段号 110；E 为精加工单边等高余量，本例为 0.3mm；F 为粗车进给速度，本例为 120mm/min。

第 6 章　线切割编程

6.1　3B 代码编程

相关知识点

1．3B 代码编程

3B 代码是一种结构相对固定的控制格式，以代码中含有 3 个 B 代码而著称，它是以 *X* 向或 *Y* 向托板进给计数的方法决定是否到达终点，只适用于 2*X* 线加工。一般使用“分隔符（*X* 坐标值）分隔符（*Y* 坐标值）分隔符（计数长度 *J*）计数方向加工指令;”，即“B（*X*）B（*Y*）B（*J*）GX Z;”或 B（*X*）B（*Y*）B（*J*）G Z;，所有数值采用绝对值，单位为μm。

下面简要介绍各代码的具体含义：

B 为分隔符；*X*、*Y*、*J* 为数值，最多 6 位，*J* 是计数长度，有时需要补前零；G 为计数方向，有 GX 和 GY 两种；Z 为加工指令，有 12 种，即 L1、L2、L3、L4、NR1、NR2、NR3、NR4、SR1、SR2、SR3、SR4。

以上的 *X*、*Y*、*J* 均取绝对值，加工直线时 *X*、*Y* 为相对于起点的终点坐标值；加工圆弧时 *X*、*Y* 为起点相对于圆心的坐标值。

2．3B 代码的表示方法

（1）直线的表示方法　第一个 B 后的数值是直线终点相对起点的 *X* 值；第二个 B 后的数值是直线终点相对起点的 *Y* 值；第三个 B 后的数值是计数长度，其确定方法：当计数方向确定后，计数长度取计数方向从起点到终点拖板移动的总距离，也就是计数方向坐标轴上投影长度的总和；G 后面为计数方向，计数方向的确定：选择 GX 和 GY 中的一种，比较直线终点相对起点的 *X*、*Y* 值，选择值大者的方向，或者说终点接近 *X* 轴时应计 X，终点接近 Y 时应计 Y，如图 6-1 所示计数方向应选择 GX。

最后为加工指令：加工指令为一些特殊字符，共有 12 种，分别为 L1、L2、L3、L4、SR1、SR2、SR3、SR4、NR1、NR2、NR3、NR4。其中属于直线表示的有四种：L1、L2、L3、L4。L 代表直线、数字代表象限，例如：L1 代表终点在 I 象限的直线。

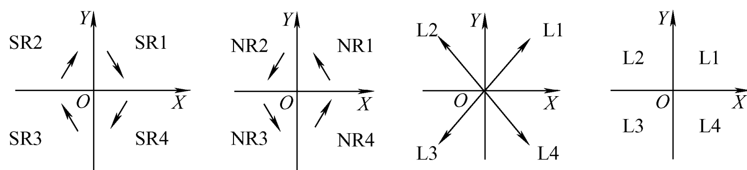


图 6-1　计数方向

其中，对于直线 L 指令，终点在坐标轴 *X* 轴正方向、*Y* 轴正方向、*X* 轴负方向、*Y* 轴负

方向分别对应 L1、L2、L3、L4。

对于顺圆弧 SR 指令，起点在坐标轴 *X* 轴正方向、*Y* 轴正方向、*X* 轴负方向、*Y* 轴负方向分别对应 SR4、SR1、SR2、SR3。

对于逆圆弧 NR 指令，起点在坐标轴 *X* 轴正方向、*Y* 轴正方向、*X* 轴负方向、*Y* 轴负方向分别对应 NR1、NR2、NR3、NR4。

直线实例：起点为（2，3），终点为（7，10）的直线的 3B 指令是：

B5000 B7000 B7000 GY L1；

（2）圆弧的表示方法　如图 6-2 所示，半径为 9.22mm，圆心坐标为（0，0），起点坐标为（−2，9），终点坐标为（9，−2）的圆弧，其 3B 指令是：

B2000 B9000 B25440 GY NR2；

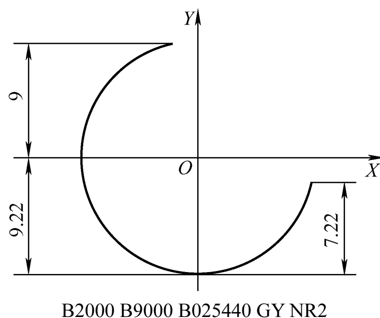


图 6-2　圆弧的表示

第一个 B 后的数值是圆弧起点相对圆心的 *X* 值；第二个 B 后的数值是圆弧起点相对圆心的 *Y* 值；第三个 B 后的数值是计数长度，其确定的方法：当计数方向确定后，计数长度取计数方向上从起点到终点拖板移动的总距离，也就是距离绝对值的和，如图 6-2 所示圆弧的计数长度为 9.0mm+9.22mm+7.22mm=25.44mm。

G 后面为计数方向，计数方向的确定：选择 GX 和 GY 中的一种，与直线加工不同的是，当圆弧终点靠近 *X* 轴时计数方向选择 *Y* 轴，输出为 GY；当圆弧终点靠近 *Y* 轴时计数方向选择 *X* 轴，输出为 GX。

最后为加工指令：加工指令为一些特殊字符，共有 12 种，表示圆弧的有 8 种，NR 代表逆弧、SR 代表顺弧，数字代表象限。例如：NR2 代表起点在Ⅱ象限的逆时针圆弧，SR4 代表起点在Ⅳ象限的顺时针圆弧。

3．坐标值的确定

加工圆弧时，程序中的 *X*、*Y* 必须是圆弧起点对其圆心的坐标值。加工斜线时，程序中的 *X*、*Y* 必须是该斜线段终点对其起点的坐标值，斜线段程序中的 *X*、*Y* 值允许把它们同时缩小相同的倍数，只要其比值保持不变即可，因为 *X*、*Y* 值只用来确定斜线的斜率，但 *J* 值不能缩小。对于与坐标轴重合的线段，在其程序中的 *X* 或 *Y* 值，均可不必写出或全写为 0，*X*，*Y* 坐标值只取其数值，不管正负，以μm 为单位。

4．计数长度 *J* 的确定

计数长度 *J* 应取计数方向从起点到终点移动的总距离，即圆弧或直线段在计数方向坐标轴上投影长度的总和。对于斜线，J=MAX（$|X|$，$|Y|$），图 6-3a 所示取 $J=|X|$，图 6-3b 所示取 $J=|Y|$。对于圆弧，它可能跨越几个象限，计数长度为所经过象限 *X* 或 *Y* 坐标移动的总距离，用公式表达为 J=MAX（$\Sigma|X|$，$\Sigma|Y|$），图 6-3c 所示取 $J=JX_1+JX_2$，图 6-3d 所示取 $J=JY_1+JY_2+JY_3$。

5．计数方向的选择

在平面直角坐标系中，由 45°、135°两条斜线将平面分割成四个区域，如图 6-4 所示。当终点坐标落在上下阴影区域内时，计数方向选 Y，否则选 X。

6. 加工指令 Z

加工指令是用来确定轨迹的形状，起点、终点所在坐标象限和加工方向的，它包括直线插补指令（L）和圆弧插补指令（R）两类。直线插补指令（L1、L2、L3、L4）表示加工的直线终点分别在坐标系的第一、二、三、四象限；如果加工的直线与坐标轴重合，则根据进给方向来确定指令。圆弧插补指令（R）根据加工方向又可分为顺圆插补（SR1、SR2、SR3、SR4）和逆圆插补（NR1、NR2、NR3、NR4）。

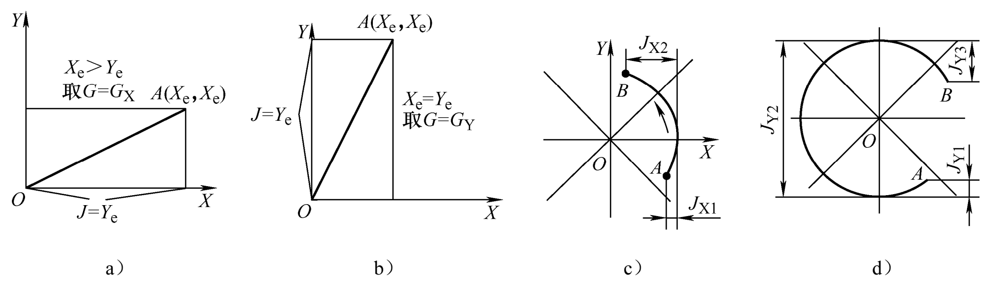


图 6-3 计数长度 J 的确定

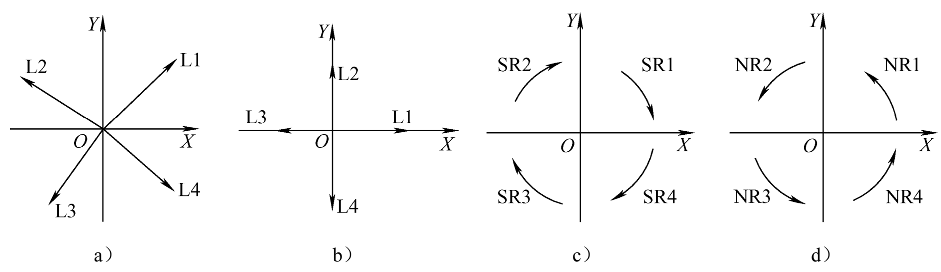
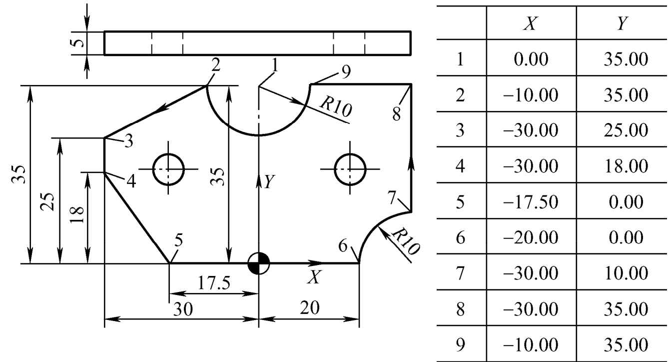


图 6-4 直线与圆弧加工指令选择

例 1：无间隙补偿功能外模零件 3B 线切割编程

加工图 6-5 所示的外模零件，其中两孔不加工，加工路线如箭头所示，穿丝孔的位置选择在 1 点，用 3B 格式编制零件的加工程序。



	X	Y
1	0.00	35.00
2	−10.00	35.00
3	−30.00	25.00
4	−30.00	18.00
5	−17.50	0.00
6	−20.00	0.00
7	−30.00	10.00
8	−30.00	35.00
9	−10.00	35.00

图 6-5 3B 线切割外模零件

外模零件 3B 代码编程如下：

N05 B10000 B0 B10000 GX L3；　　　　走到 2 点

N10 B20000 B10000 B20000 GX L3；　　走到 3 点
N15 B0 B7000 B7000 GY L4；　　走到 4 点
N20 B12500 B18000 B18000 GY L4；　　走到 5 点
N25 B37500 B0 B37500 GX L1；　　走到 6 点
N30 B10000 B0 B10000 GX SR2；　　走到 7 点
N35 B0 B25000 B25000 GY L2；　　走到 8 点
N40 B20000 B0 B20000 GX L3；　　走到 9 点
N45 B10000 B0 B20000 GX SR4；　　走到 2 点
N50 D；　　停机

注意穿丝孔和电极丝切入位置的选择：穿丝孔是电极丝相对工件运动的起点，同时也是程序执行的起点，一般选在工件上的基准点处。为缩短开始切割时的切入长度，穿丝孔也可选在距离型孔边缘 2～5mm 处，加工凸模时，为减小变形，电极丝切割时的运动轨迹与边缘的距离应大于 5mm。

例 2：有间隙补偿功能 3B 线切割编程

如图 6-6 所示，凸模由三段直线与一段圆弧组成，应编制四条程序段（沿逆时针方向加工）。此外，还应增加钼丝从工件外部切入到轮廓线的引入段和从轮廓结束顺原路径引出的程序段。若不考虑丝径补偿，如图 6-6a 所示，直接按图形轮廓编程，则所编写的加工程序见表 6-1。

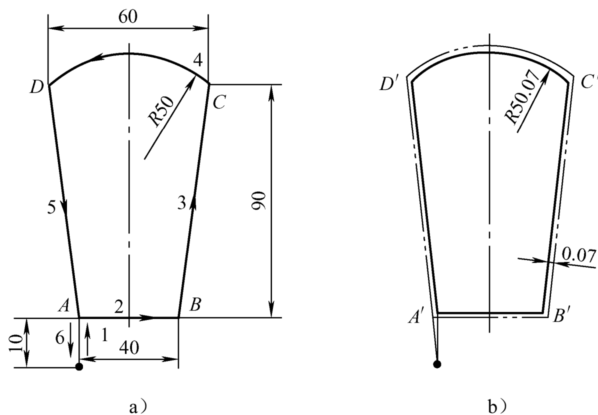


图 6-6　凸模

表 6-1　不考虑补偿时的程序清单

序　　号	B	X	B	Y	B	J	G	Z
1	B		B		B	10000	GY	L2
2	B		B		B	40000	GX	L1
3	B	1	B	9	B	90000	GY	L1
4	B	30000	B	40000	B	60000	GX	NR1
5	B	1	B	9	B	90000	GY	L4
6	B		B		B	10000	GX	L4
7	D							

若考虑丝径补偿，如图 6-6b 所示，设所用钼丝直径为ϕ0.12mm，单边放电间隙为 0.01mm，则应将整个零件图形轮廓沿周边均匀增大一个（0.01mm+0.12mm/2）=0.07mm 的值，得到图中双点画线所示的轮廓后，按虚线轮廓（即钼丝中心轨迹）编程，程序清单见表 6-2。

表 6-2　考虑补偿时的程序清单

序　　号	B	*X*	B	*Y*	B	*J*	G	*Z*
1	B	63	B	9930	B	9930	GY	L2
2	B		B		B	40125	GX	L1
3	B	10011	B	90102	B	90102	GY	L1
4	B	30074	B	40032	B	60148	GX	NR1
5	B	10011	B	90102	B	90102	GY	L4
6	B	63	B	9930	B	9930	GY	L4
7	D							

知识拓展：4B 编程格式

4B 指令用于具有间隙补偿功能和锥度补偿功能的数控线切割机床的程序编制。所谓间隙补偿，指的是钼丝在切割零件时，钼丝中心运动轨迹能根据要求自动偏离编程轨迹一段距离（即补偿量）。当补偿量设定为偏移量时，编程轨迹即为零件的轮廓线。显然，按零件的轮廓编程要比按钼丝中心运动轨迹编程方便得多，轨迹计算也比较简单。而且，钼丝磨损后，直径变小，当单边放电间隙 *Z* 随切割条件的变化而变化后，也不需要改变程序，只需改变补偿量即可。锥度补偿指的是系统能根据要求，同时控制 *X*、*Y*、*U*、*V* 四轴的运动，*X*、*Y* 为机床工作台的运动，即零件的运动，*U*、*V* 为上线架导轮的运动，它们分别平行于 *X*、*Y* 轴，使钼丝偏离垂直方向一个角度（即锥度），切割出具有锥度的零件来。

4B 指令编程格式见表 6-3。

表 6-3　4B 指令编程格式

±	B	*X*	B	*Y*	B	*L*	G	Z
正负补偿	分隔符	坐标值	分隔符	坐标值	分隔符	计数长度	计数方向	加工指令

1）4B 指令就是带“±”符号的 3B 指令，为了区别于一般的 3B 指令，故称之为 4B 指令。“±”符号用以反映间隙补偿信息和锥度补偿信息，其他与 3B 指令完全一致。

2）间隙补偿切割时，使用“+”号表示正补偿，当相似图形的线段大于基准轮廓尺寸时为正补偿；“−”号表示负补偿，当相似图形的线段小于基准轮廓尺寸时为负补偿。具体而言，对于直线，在 B 之前加“±”符号仅是为了使指令的格式能够一致，不需要严格规定；对于圆弧，规定以凸模为准，正偏时（圆半径增大）加“+”号，负偏时（圆半径减小）加“−”号。在进行间隙补偿切割时，线和线之间必须是光滑的连接；若不是光滑的连接，则必须加过渡圆弧使之光滑。

3）锥度切割时，必须使钼丝相对于垂直方向倾斜一个角度。钼丝的倾斜方向由程序的第一条 4B 指令决定，即由第一条引入程序中的“±”符号决定。若第一条指令之前加“+”号，则按照如下规则倾斜钼丝（若加“−”号，则向相反方向倾斜钼丝）：

① 若引入程序段是直线，则按照直线的法线方向倾斜钼丝。如图 6-7a 所示，和 *L* 直线相垂直的直线为 *L* 直线的法线，箭头所指方向即为钼丝的倾斜方向。

② 若引入程序段是圆弧，则钼丝的倾斜方向和切割开始点的圆半径方向一致。锥度切割一般采用正锥度角，所切割零件为上大下小，若有必要切割上小下大的零件，则可输入负的锥度角，系统会自动控制向所定义方向的相反方向倾斜钼丝。

如切割图 6-7b 所示的凹模，凹模未注圆角半径为 1mm，线切割机床的脉冲当量为 0.001mm，用直径为 0.15mm 的钼丝加工，放电间隙按经验取 0.014mm，则 $f=d/2+Z=0.15\text{mm}/$

2+0.014mm=0.089mm。选择圆弧中心 *O* 为引入点（穿丝孔位置），设 *O* 点为程序起点，钼丝中心运动轨迹如图 6-7b 中的双点画线所示，根据编程规则可编写出凹模的加工程序。

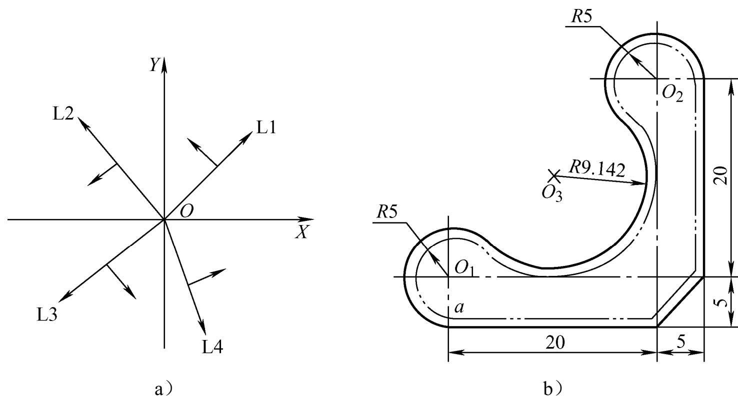


图 6-7　4B 指令编程模式

不考虑切割锥度，机床不具有间隙补偿功能的加工程序（3B 指令编程）为：

N000 B0 B0 B4911 CY L4；
N001 B0 B0 B19586 CX L1；
N002 B0 B911 B644 CX NR4；
N003 B4414 B4414 B4414 CY L1；
N004 B144 B144 B144 CY NR4；
N005 B0 B0 B19586 CY L2；
N006 B4911 B0 B13295 CX NR1；
N007 B6527 B6527 B18463 CY SR1；
N008 B3473 B3473 B1329 CY L2；
N009 B0 B0 B4911 CY L2；
N010 D；

若进行正锥度切割，机床具有间隙补偿功能的加工程序（4B 指令编程）为：

N000 B0 B0 B5000 CX L1；
N001 −B0 B0 B19586 CY L4；
N002 −B1000 B0 B707 CX SR2；
N003 −B4414 B4414 B4414 CY L3；
N004 −B707 B707 B707 CX SR4；
N005 −B0 B0 B19586 CX L3；
N006 −B0 B5000 B13536 CX SR3；
N007 B6464 B646 B18284 CX NR3；
N008 −B3536 B3536 B13536 CY SR 3；
N009 −B0 B0 B5000 CX L3；
N010 D；

6.2　ISO 代码编程

相关知识点

目前各种线切割数控系统所使用的 ISO 格式指令与国际标准基本一致，但也存在个别不

同之处。在编程之前应仔细了解所选用数控线切割机床的规格、性能及数控系统所具有的功能，详细阅读该数控系统的编程说明书及指令格式等，尤其要注意区分指令形式相同而功能有所区别的指令和本系统特有的指令，然后按照具体机床规定使用的指令格式，将零件的尺寸、切割轨迹、电极丝半径和放电间隙补偿等加工数据编入加工程序。表 6-4 列出了一般线切割数控系统特有指令的功能和程序段的格式。此外，线切割数控系统还允许利用 T 或 M 功能指令实现打开、关闭工作液泵，起动、关闭走丝机构，暂停或结束切割等操作。

表 6-4 线切割数控系统特有指令的功能和程序段的格式

指 令	功 能	程 序 格 式
G92	设置电极丝的位置坐标，确定程序的加工起点	G92 *X* 坐标值 *Y* 坐标值； 坐标值单位：μm
G40	取消电极丝半径和放电间隙补偿	G40；
G41	电极丝半径和放电间隙左补偿。沿电极丝切割轨迹的前进方向上，电极丝向左偏移指定量	G41 D； D：电极丝半径与放电间隙之和
G42	电极丝半径和放电间隙右补偿。沿电极丝切割轨迹的前进方向上，电极丝向右偏移指定量	G42 D； D：电极丝半径与放电间隙之和
G50	取消锥度	G50；
G51	锥度左倾斜，沿电极丝切割轨迹的前进方向上，电极丝上端向左倾斜指定角度	G51 A； A：锥度值
G52	锥度右倾斜，沿电极丝切割轨迹的前进方向上，电极丝下端向右倾斜指定角度	G52 A； A：锥度值

快走丝数控电火花线切割机床常用的 ISO 代码指令如下：

（1）G00 快速定位指令　在线切割机床不放电的情况下，使指定的某轴快速移动到指定位置。编程格式：

G00 X_ Y_；

（2）G01 直线插补指令　编程格式：

G01 X_ Y_ （U_ V_ ）；

其功能是在各个坐标平面内，线切割加工任意斜率的直线轮廓和用直线逼近曲线轮廓。例如：

G92 X40000 Y20000；
G01 X80000 Y60000；

（3）G02、G03 圆弧插补指令　编程格式：

G02 X_ Y_ I_ J_；或 G03 X_ Y_ I_ J_；

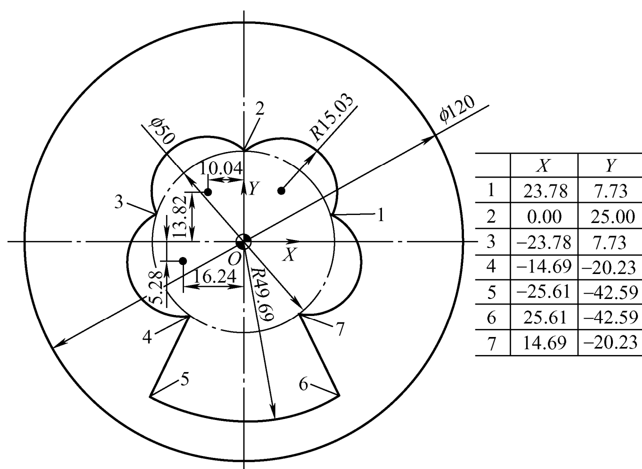
其中：

X、Y——圆弧终点坐标。

I、J——圆心坐标，是圆心相对圆弧起点的增量值，I 是 *X* 方向的坐标值，J 是 *Y* 方向的坐标值。

例 1：线切割 ISO 代码编程

试采用 ISO 代码指令编写图 6-8 所示工件的线切割加工程序，内轮廓穿丝孔设在孔中心点 O，按 1—2—3—4—5—6—7—1 的顺序切割，外轮廓穿丝孔设在（*X*0、*Y*−70）的位置，顺时针走一圈切割 ϕ120mm 外轮廓，程序如下：



	X	Y
1	23.78	7.73
2	0.00	25.00
3	−23.78	7.73
4	−14.69	−20.23
5	−25.61	−42.59
6	25.61	−42.59
7	14.69	−20.23

图 6-8　内外轮廓工件的线切割

H001=0.10；	设定补偿距离为 0.10mm
%O92；	
N05 T84 T86 G90 G54；	工作液开，起动钼丝电动机
N10 G92 X0 Y0；	设定钼丝起始点坐标
N15 G41 G01 X23.78 Y7.73 H001；	走到 1 点，并完成钼丝补偿
N20 G03 X0 Y25 I−13.38 J6.05；	走到 2 点，圆弧切割
N25 G03 X−23.78 Y7.73 I−10.04 J−11.18；	走到 3 点，圆弧切割
N30 G03 X−11.69 Y−20.23 I7.54 J−13.01；	走到 4 点，圆弧切割
N35 G01 X−25.61 Y−43.59；	走到 5 点，直线切割
N40 G03 X25.61 Y−43.59 I25.61 J43.59；	走到 6 点，圆弧切割
N45 G01 X11.69 Y−20.23；	走到 7 点，直线切割
N50 G03 X23.78 Y7.73 I1.55 J25.51；	走到 1 点，圆弧切割，内轮廓结束
N55 G40 X0 Y0；	取消刀补，回到起始点
N60 T85 T87；	工作液关，关闭钼丝电动机
N65 M00；	重新在（X0，Y−70）的位置穿丝
N70 G92 X0 Y−70；	设定钼丝起始点坐标，准备加工外轮廓
N75 T84 T86 G90；	工作液开，起动钼丝电动机
N80 G41 G01 X0 Y−60 H001；	走到ϕ120mm 轮廓点，并完成钼丝补偿
N85 G02 X0 Y−60 I0 J60；	顺时针走一圈切割ϕ120mm 外轮廓
N90 G40 X0 Y−70；	取消刀补，回到起始点
N95 T85 T87；	工作液关，关闭钼丝电动机
N100 M02；	程序结束

相关知识点

1．电极丝位置的调整

（1）目测法　对于加工要求较低的工件，在确定电极丝与工件基准间的相对位置时，可以直接利用目测或借助 2～8 倍的放大镜来进行观察。利用穿丝处划出的十字基准线，分别沿划线方向观察电极丝与基准线的相对位置，根据两者的偏离情况移动工作台，当电极丝中心分别与纵横方向基准线重合时，工作台纵、横方向上的读数就确定了电极丝中心的位置。

（2）火花法　移动工作台使工件的基准面逐渐靠近电极丝，在出现火花的瞬时，记下工作台的相应坐标值，再根据放电间隙推算电极丝中心的坐标。此法简单易行，但往往因电极

丝靠近基准面时产生的放电间隙，与正常切割条件下的放电间隙不完全相同而产生误差。

（3）自动找中心　所谓自动找中心，就是让电极丝在工件孔的中心自动定位。此法是根据电极丝与工件的短路信号来确定电极丝的中心位置。数控功能较强的线切割机床常用这种方法。

2. 工作液的选配

工作液对切割速度、表面粗糙度、加工精度等都有较大影响，加工时必须正确选配。常用的工作液主要有乳化液和去离子水。

1）慢速走丝线切割加工，目前普遍使用去离子水。为了提高切割速度，在加工时还要加进有利于提高切割速度的导电液，以增加工作液的电阻率。加工淬火钢，使电阻率在 $2\times10^4\Omega\cdot$cm 左右；加工硬质合金，使电阻率在 $30\times10^4\Omega\cdot$cm 左右。

2）对于快速走丝线切割加工，目前最常用的是乳化液。乳化液是由乳化油和工作介质配制（浓度为 5%～10%）而成的。工作介质可用自来水，也可用蒸馏水、高纯水和磁化水。

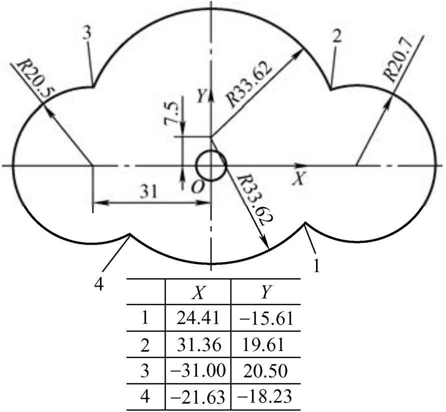
例 2：圆弧内模零件 ISO 线切割编程

编制图 6-9 所示零件（图示尺寸是根据刃口尺寸公差及凸凹模配合间隙计算出的平均尺寸）的数控线切割程序。电极丝为 ϕ0.1mm 钼丝，单面放电间隙为 0.01mm。

1. 确定补偿距离

补偿距离为

$$\Delta R=(0.1/2+0.01)\text{mm}=0.06\text{mm}$$



	X	Y
1	24.41	−15.61
2	31.36	19.61
3	−31.00	20.50
4	−21.63	−18.23

图 6-9　圆弧内模零件 ISO 线切割

2. 线切割编程

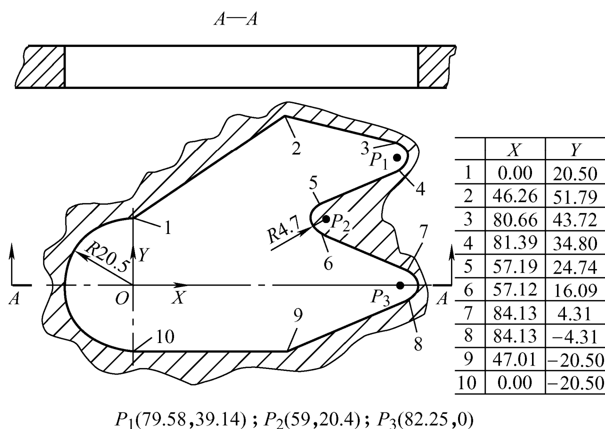
程序如下：

```
%O320;                                  程序名，%O 开头，后面是任意数字
N05 G92 X0 Y0 M63;                      设定坐标系，M63 穿丝，穿丝孔设在 O 点
N10 T84 T86;                            T84：开工作液泵，T86：起动走丝机构
N15 G41 D110;                           放电间隙左补，D10=（0.1/2+0.01）mm
N20 G01 X24410 Y−15610;                 走到 1 点，开始加工
N25 G03 X31360 Y19610 I−36 J−19610;     走到 2 点
N30 X−31000 Y20500 I−21360 J−12110;     走到 3 点
N35 X−21630 Y−18.230 I−1080 J−4580;     走到 4 点
```

N40 X24410 Y−15160 I21630 J18230；　　走到 1 点
N45 G01 G40 X0 Y0；　　到第 *O* 点
N50 M02；　　程序结束

例 3：内模零件 ISO 线切割编程

图 6-10 所示的凹模由多段直线与多段圆弧组成，按图中 1—2—3—…—10 所示加工轨迹方向进行切割，电极丝直径为ϕ0.15mm，单边放电间隙为 0.01mm，以绝对坐标编程方式进行编程。



	X	Y
1	0.00	20.50
2	46.26	51.79
3	80.66	43.72
4	81.39	34.80
5	57.19	24.74
6	57.12	16.09
7	84.13	4.31
8	84.13	−4.31
9	47.01	−20.50
10	0.00	−20.50

P_1(79.58,39.14)；P_2(59,20.4)；P_3(82.25,0)

图 6-10　ISO 线切割内模零件

内模零件 ISO 加工程序：

%O320；　　程序名，%O 开头，后面是任意数字
N05 G92 X0Y0 M63；　　设定坐标系，M63 穿丝，穿丝孔设在 O 点
N10 T84 T86；　　T84：开工作液泵，T86：起动走丝机构
N15 G41 D110；　　放电间隙左补，D110=（0.15/2+0.01）mm
N20 G01 X0 Y20500；　　走到 1 点，开始加工
N25 X6260 Y51790；　　走到 2 点
N30 X80660 Y43720；　　走到 3 点
N35 G02 X81390 Y34800 I−1080 J−4580；　　走到 4 点
N40 G01 X57190 Y24740；　　走到 5 点
N45 G03 X57120 Y16090 I1810 J−4340；　　到第 6 点
N50 G01 X84130 Y4310；　　到第 7 点
N55 G02 X84130 Y−4310 I−18800 J−4310；　　到第 8 点
N60 G01 X47010 Y−20500；　　到第 9 点
N65 G01 X0 Y−20500；　　到第 10 点
N70 G02 X− Y20500 I0 J20500；　　到第 1 点
N75 G01 G40 X0 Y0；　　退到 O 点
N80 M02；　　程序结束

例 4：样板的电火花加工

加工一个带有 8 个孔的样板，从 1～8 各孔的加工表面粗糙度值依次减小，最后一个孔的表面粗糙度值 *Ra* 为 0.3μm，孔直径为 20mm，如图 6-11 所示。

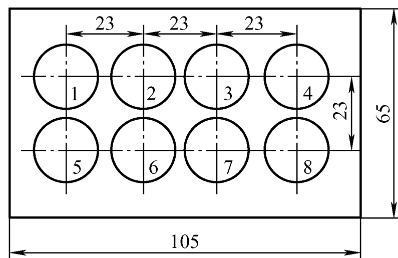


图 6-11　表面粗糙度的 8 孔样板

1．选择加工条件 C 代码

加工过程分为粗加工（C100、C101、C102）、半精

加工（C103、C104、C105）和精加工（C900、C903）；粗加工和半精加工使用负极性加工，精加工使用正极性加工。电火花用户设定加工参数（C 代码）见表 6-5，注意是三位数的 C 代码，不同于 G 代码！

表 6-5　电火花用户设定加工参数（C 代码）

序　号	参　数	功　能	范　围	备　注
1	T_{on}	脉冲宽度	1～2047μm	脉冲宽度增大可提高加工效率，降低电极消耗，但加工表面粗糙度值变大
2	T_{off}	脉冲间隙	6～2047μm	脉冲间隙增大、加工效率降低、电极损耗加大、间隙增大可消除加工中产生的拉弧现象
3	I_s	峰值电流	0～99mA	与 T_{on} 一起构成脉冲放电能量，能量越大蚀除的金属体积就越大，生产率提高，但表面粗糙度值变大
4	*H*	高压控制	0～7V	设定高压辅助控制回路的峰值击穿电流，不同的材质选择不同的数值，也可选择不用，即“0”
5	*SV*	基准电压	20～200mV	电火花加工时自适应控制的基准，当测得电极间的电压大于基准电压时，电极前进；当低于基准电压时后退。*SV* 小，放电频率高、加工效率高，产生拉弧现象的可能性增加；*SV* 大，极间距离扩大，放电频率降低，加工效率降低
6	*UP*	上升距离	0～9mm	定时抬刀周期设定，*UP* 越大，刀具的抬升距离就越大；*DN* 越大，刀具的放电加工时间越长。定时抬刀有利于电蚀产物的排除，保持稳定的加工状态。特别设置的快速抬刀功能可以省略冲油操作过程。一般短脉冲超精加工时，*UP*：*DN*=2:4 或 3:4
7	*DN*	放电时间	0～9μs	
8	*POL*	放电极性	+/–	正极性是指工件接正极，刀具接负极；负极性是指工件接负极，工具接正极。若极性错误，容易造成电极消耗异常大，放电不稳定，效率降低等。一般短脉冲超精加工时使用正极性，长脉冲粗加工时使用负极性
9	*VL*	低电压		对应串载电压分别为 90V 和 120V
	C 代码	加工条件代码		C 代码为经验加工条件，000～099 为用户定义，100～999 由系统定义

2. 加工工艺安排

从 1～8 孔加工的表面粗糙度依次提高，最终 8 号孔达到 *Ra*0.3μm，加工过程安排如下：①使用 C100 加工 1～8 孔；②使用 C101 加工 2～8 孔；③使用 C102 加工 3～8 孔；……⑧使用 C903 加工 8 号孔，C 代码的工艺参数组合见表 6-6。

8 个孔加工条件下的摇动半径分别为 5μm、100μm、150μm、180μm、200μm、210μm、220μm、225μm。

表 6-6　C 代码的工艺参数组合

工艺参数 / C 代码	脉冲宽度/μm	脉冲间隙/μm	峰值电流/mA	高压控制/V	基准电压/mV	上升距离/mm	放电时间/μs	放电极性(±)	低压电压/V	电容/μF
C100	280	90	6	1	50	2	4	–	0	0
C101	210	90	5	1	60	2	4	–	0	0
C102	150	80	4	1	60	2	4	–	0	0
C103	80	80	3	1	80	2	4	–	0	0
C104	40	40	2	1	90	2	3	–	0	0
C105	40	20	1	1	100	2	3	–	0	0
C900	8	12	0	5	120	3	2	+	0	0
C903	2	8	0	1	135	3	2	+	0	0

3. 编制程序

程序如下

N05 H000=500；	设定 H000 参数为 500
N10 G80 Z−；	*Z* 轴负向接触感知有效
N15 G90 G92 X0 Y0 Z0；	
N20 M05 G00 Z5.0；	
N25 C100 LN001 STEP5；	C 代码粗加工
N30 G01 Z260−H000；	1 孔，*X*0，*Y*0，*Z*−240
N35 M98 P0001；	调用移位子程序，移至 2 孔
N40 G01 Z260−H000；	2 孔，*X*23.0，*Y*0
N45 M98 P0001；	
N50 G01 Z260−H000；	3 孔，*X*46.0，*Y*0
N55 M98 P0001；	
N60 G01 Z260−H000；	4 孔，*X*69.0，*Y*0
N65 G00 X0 Y−23.0；	
N70 G01 Z260−H000；	5 孔，*X*0，*Y*−23.0，*Z*−240
N75 M98 P0001；	
N80 G01 Z260−H000；	6 孔，*X*23.0，*Y*−23.0
N85 M98 P0001；	
N90 G01 Z260−H000；	7 孔，*X*46.0，*Y*−23.0
N95 M98 P0001；	
N100 G01 Z260−H000；	8 孔，*X*69.0，*Y*−23.0
N105 G00 X23.0 Y0；	
N110 C101 LN001 STEP100；	C 代码粗加工
N115 G01 Z160−H000；	2 孔，*X*23.0，*Y*0，*Z*−340
N120 M98 P0001；	
N125 G01 Z160−H000；	3 孔，*X*46.0，*Y*0
N130 M98 P0001；	
N135 G01 Z160−H000；	4 孔，*X*69.0，*Y*0
N140 G00 X0 Y−23.0；	
N145 G01 Z160−H000；	5 孔，*X*0，*Y*−23.0
N150 M98 P0001；	
N155 G01 Z160−H00；	6 孔，*X*23.0，*Y*−23.0
N160 M98 P0001；	
N165 G01 Z160−H000；	7 孔，*X*46.0，*Y*−23.0
N170 M98 P0001；	
N175 G01 Z160−H000；	8 孔，*X*69.0，*Y*−23.0
N180 G00 X46.0 Y0；	
N185 C102 LN001 STEP150；	C 代码粗加工
N190 G01 Z80−H000；	*X*46.0，*Y*0，*Z*−420
N195 M98 P0001；	
N200 G01 Z80−H000；	*X*69.0，*Y*0
N205 G00 X0 Y−23.0；	
N210 G01 Z80−H000；	*X*0，*Y*−23.0
N215 M98 P0001；	
N220 G01 Z80−H000；	*X*23.0，*Y*−23.0
N225 M98 P0001；	
N230 G01 Z80−H000；	*X*46.0，*Y*−23.0
N235 M98 P0001；	

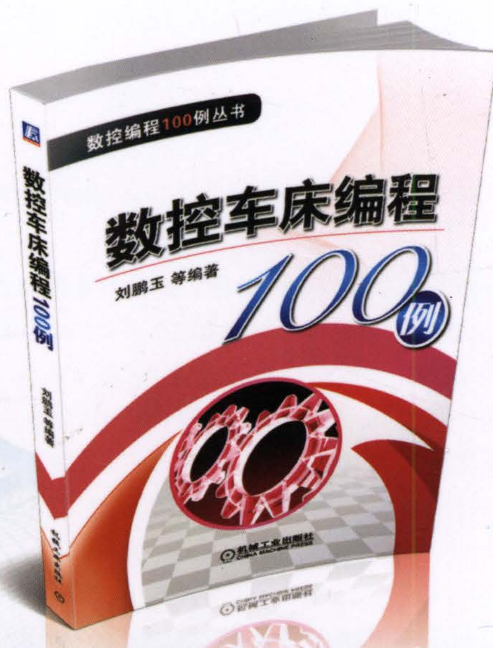
```
N240 G01 Z80–H000；                X69.0，Y–23.0
N245 G00 Y0；
N250 C103 LN001 STEP180；          C 代码半精加工
N255 G01 Z–20–H000；               X69.0，Y0，Z–480
N260 G00 X0 Y–23.0；
N265 G01 Z–20–H000；               X0，Y–23.0
N270 M98 P0001；
N275 G01 Z–20–H000；               X23.0，Y–23.0
N280 M98 P0001；
N285 G01 Z–20–H000；               X46.0，Y–23.0
N290 M98 P0001；
N295 G01 Z–20–H000；               X69.0，Y–23.0
N300 G00 X0；
N305 C104 LN001 STEP200；          C 代码半精加工
N310 G01 Z–20–H000；               X0，Y–23.0，Z–520
N315 M98 P0001；
N320 G01 Z–20–H000；               X23.0，Y–23.0
N325 M98 P0001；
N330 G01 Z–20–H000；               X46.0，Y–23.0
N335 N98 P0001；
N340 G01 Z–20–H000；               X69.0，Y–23.0
N345 G00 X23.0；
N350 C105 LN001 STEP210；          C 代码半精加工
N355 G01 Z–60–H000；               X23.0，Y–23.0，Z–560
N360 M98 P0001；
N365 G01 Z–60–H000；               X46.0，Y–23.0
N370 M98 P0001；
N375 G01 Z–60–H000；               X69.0，Y–23.0
N375 G00 X46.0；
N380 C900 LN001 STEP220；          C 代码精加工
N385 G01 Z–100–H000；              X46.0，Y23.0，Z–600
N390 M98 P0001；
N395 G01 Z–100–H000；              X69.0，Y–23.0
N400 C903 LN001 STEP225；          C 代码精加工
N405 G01 Z–135–H000；              X69.0，Y–23.0，Z–635
N410 G00 X0 Y0；                   返回原点
N415 M02；                         主程序结束

%O324；                            移位子程序
N05 G91；
N10 G00 X23.0；                    每次移动 23μm
N15 G90；
N20 M99；                          子程序结束
```

参 考 文 献

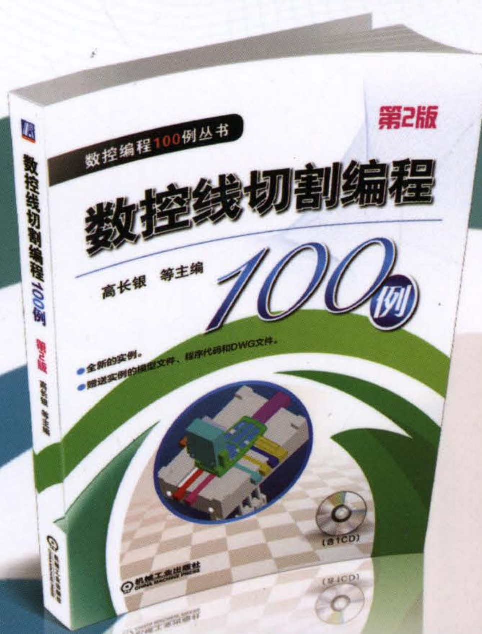
[1] 杨顺田，刘莉．SINUMERIK 数控系统编程[M]．北京：北京理工大学出版社，2011．
[2] 沈建峰，金玉峰．数控编程 200 例[M]．北京：中国电力出版社，2008．
[3] 张思弟，贺曙新．数控编程加工技术[M]．北京：化学工业出版社，2005．
[4] 王睿鹏．数控机床编程与操作[M]．北京：机械工业出版社，2009．
[5] 赵松涛，数控机床编程与操作——SINUMERIK 数控系统[M]．西安：西安电子科技大学出版社，2006．
[6] 周保牛，黄俊桂．数控编程与加工技术[M]．北京：机械工业出版社，2009．
[7] 叶伯生，戴永清．数控加工编程与操作[M]．武汉：华中科技大学出版社，2005．
[8] 袁　锋．数控车床培训教材[M]．北京：机械工业出版社，2010．
[9] 陈云卿，杨顺田．数控铣镗床编程与技能训练[M]．北京：化学工业出版社，2008．
[10] 陈艳红，吴长有．数控手工编程 100 例[M]．武汉：华中科技大学出版社，2012．
[11] 刘战术．数控机床与编程[M]．北京：机械工业出版社，2008．
[12] 劳动社会保障部教材办公室．数控车床编程与操作[M]．北京：中国劳动社会保障出版社，2007．
[13] 施玉飞．SIEMENS 数控系统编程指令详解及综合实例[M]．北京：化学工业出版社，2008．
[14] 杨顺田，彭美武．燃汽轮机缸体倾斜孔数控铣削加工参数化编程[J]．机床与液压，2010，10:33-36．

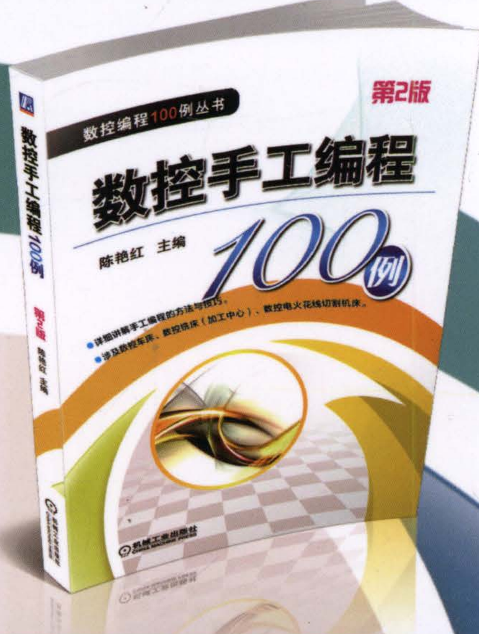




ISBN 978-7-111-48432-5

ISBN 978-7-111-36196-1





ISBN 978-7-111-44408-4

ISBN 978-7-111-47245-2

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
金书网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版



机械工业出版社微信服务号



机械工业出版社科普平台
科技有的聊



机械工业出版社制造业资讯
制造业那些事儿

上架指导： 工业技术／机械工程／数控编程
ISBN 978-7-111-49064-7
策划编辑◎周国萍 / 封面设计◎马精明



定价：59.00元